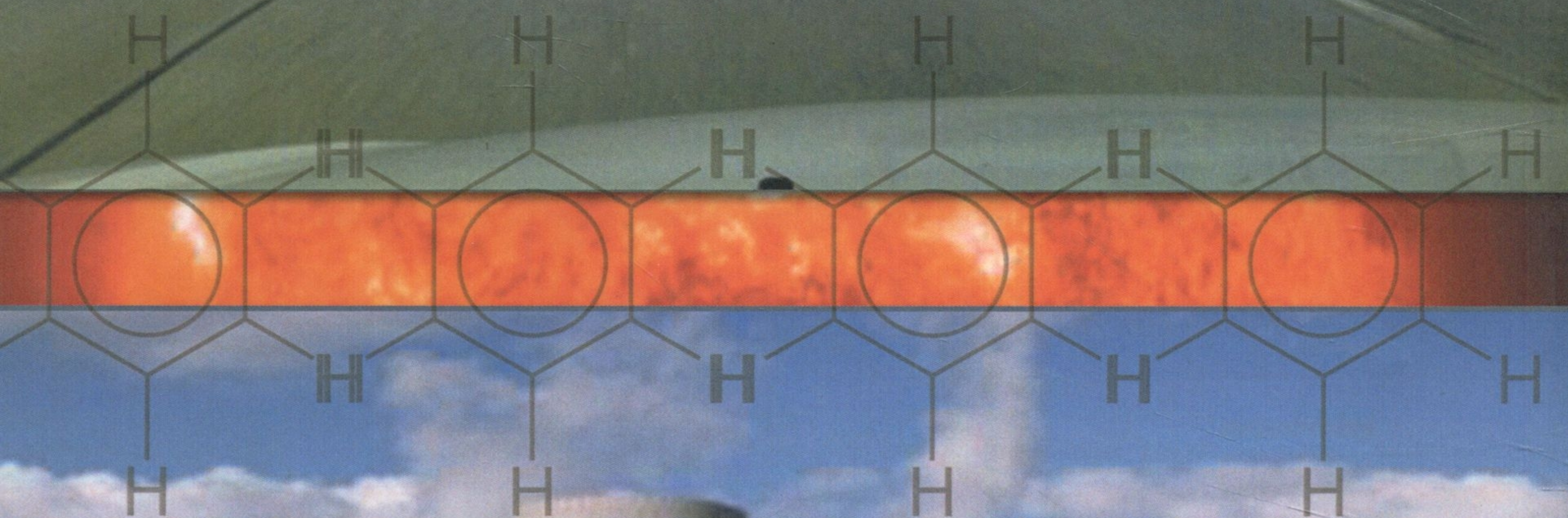


# مصادر الطاقة غير التقليدية



ترجمة وتقديم  
عاطف يوسف محمود

تأليف: د.س. شاوهان  
س.ك. سريفاستافا

1832





مصادر الطاقة غير التقليدية

المركز القومي للترجمة  
إشراف: جابر عصفور

- العدد: 1832
- مصادر الطاقة غير التقليدية
- د. س. شأوهان، وس. ك. سريفاستافا
- عاطف يوسف محمود
- الطبعة الأولى 2012

هذه ترجمة كتاب:

Non-Conventional Energy Resources (2<sup>nd</sup> Edition)

By: D.S. Chauhan & S.K. Srivastava

Copyright © 2006, 2005 by New Age International (P) Ltd. Publishers

Arabic Translation © 2012, National Center for Translation

Published in arrangement with New Age International (P) Ltd.

Publishers., New Delhi, India.

[www.newagepublishers.com](http://www.newagepublishers.com)

All Rights Reserved

---

حقوق الترجمة والنشر بالعربية محفوظة للمركز القومي للترجمة

شارع الجبلية بالأوبرا - الجزيرة - القاهرة. ت: ٢٧٣٥٤٥٢٤ فاكس: ٢٧٣٥٤٥٥٤

El Gabalaya St. Opera House, El Gezira, Cairo.

E-mail: [egyptcouncil@yahoo.com](mailto:egyptcouncil@yahoo.com)

Tel: 27354524

Fax: 27354554



# مصادر الطاقة غير التقليدية

تأليف: د.س. شاوهان

س. ك. سريفاستافا

ترجمة وتقديم: عاطف يوسف محمود



2012



بطاقة الفهرسة  
إعداد الهيئة العامة لدار الكتب والوثائق القومية  
إدارة الشئون الفنية

شاوهان، د. س.  
مصادر الطاقة غير التقليدية / تأليف: د. س. شاوهان، ش. ك.  
سرياستافا، ترجمة وتقديم: عاطف يوسف محمود؛  
ط ١ - القاهرة: المركز القومي للترجمة، ٢٠١٢  
٥٤٠ ص، ٢٤ سم  
١ - مصادر الطاقة  
(أ) سرياستافا، س. ك. (مؤلف مشارك)  
(ب) محمود، عاطف يوسف (مترجم ومقدم)  
(ج) - العنوان  
٣٣٣,٨٢

رقم الإيداع: ٢٠١١/١٩٤٨  
الترقيم الدولي: 9 - 434 - 704 - 977 - 978 - I.S.B.N  
طبع بالهيئة العامة لشئون المطابع الأميرية

تهدف إصدارات المركز القومي للترجمة إلى تقديم الاتجاهات والمذاهب الفكرية المختلفة للقارئ العربي وتعريفه بها، والأفكار التي تتضمنها هي اجتهادات أصحابها في ثقافتهم ولا تعبر بالضرورة عن رأي المركز.



## المحتويات

7	.....	مقدمة المترجم
11	.....	مقدمة المؤلفين (الطبعة الثانية)
13	.....	مقدمة المؤلفين (الطبعة الأولى)
15	.....	الباب الأول: مصادر الطاقة
61	.....	الباب الثاني: الخلية الشمسية
121	.....	الباب الثالث: الإشعاع الشمسي
203	.....	الباب الرابع: معدات تجميع الطاقة الشمسية
263	.....	الباب الخامس: تخزين الطاقة الشمسية
293	.....	الباب السادس: الطاقة الجيو حرارية
309	.....	الباب السابع: مولدات القوى المغناطيسية - الهيدرو ديناميكية
325	.....	الباب الثامن: خلية الوقود
343	.....	الباب التاسع: المولدات الحرارية الأيونية والحرارية الكهربائية
357	.....	الباب العاشر: طاقة الرياح



401	الباب الحادى عشر: الطاقة الحيوية.....
433	الباب الثانى عشر: تحويل طاقة المحيط الحرارية.....
443	الباب الثالث عشر: طاقة موجات المد والجزر.....
459	الباب الرابع عشر: طاقة الهيدروجين.....
485	الباب الخامس عشر: محطات القوى الكهرومائية متناهية الصغر.....
503	المراجع.....
517	تمارين.....



## مقدمة المترجم

الطاقة... هي قاطرة التنمية، وما من سبيل - فى مصر أو فى أى مكان من العالم - أن تنهض تنمية دون كهرباء، فهى عصب الحياة، لذا فقد غدا تأمين إمدادات الطاقة من القضايا التى تشغل دول العالم، توخيا لحماية أمنها القومى وتأمين احتياجات الأجيال القادمة من الطاقة، بأسلوب يكفل توفير خدمات الطاقة بما يتناسب مع متطلبات التنمية.

وتقوم السياسة الرشيدة لقطاع الكهرباء على عدد من المحاور: المحور الأول هو تنويع مصادر الطاقة الكهربائية، والمحور الثانى: هو الاستغلال الأمثل لمصادر الطاقة المتاحة، والمحور الثالث: تحسين الكفاءة والحفاظ على البيئة، فإذا ما بحثنا موضوع تنويع مصادر الطاقة نجد من الأقوم أن نتبع سياسة تقوم على استخدام مختلف التكنولوجيات المتاحة بالنسبة للطاقة التقليدية، فهناك المحطات البخارية، ومحطات الدورة المركبة، بالإضافة إلى المحطات الغازية، وإذا تكلمنا فيما يخص مصر عن الطاقة الهيدروإليكية، سنجد أنها قد نجحت فى الاستفادة من كل المصادر المائية المتاحة لديها فى توليد الكهرباء، حيث توجد الآن قدرات مركبة على امتداد نهر النيل تبلغ نحو ٢٨٤٠ ميجاوات تخدم جزءاً كبيراً من أراضي الوطن... ولأن تلك الأراضي مؤهلة، وتتميز بامتداد الشبكة الكهربائية القومية خلالها، فهناك العديد من المشروعات والتطبيقات فى مجالى الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، ومن ثم فقد وضعت خطة تهدف إلى رفع نصيب مشاركة الطاقة المتجددة إلى ٢٠% (منها ١٢% طاقة رياح) من إجمالى إنتاج الطاقة عام ٢٠٢٠.



هذا، علمًا بأن لدى قطاع الكهرباء بمصر خططًا حتى عام ٢٠٢٧ لإضافة قدرات كهربية جديدة تصل إلى ٥٨ ألف ميغاوات وتنفيذ شبكات نقل وتوزيع لمجابهة التطور في الطلب على الطاقة، كما يولى القطاع مشروعات الطاقة المتجددة كبير أهمية لثراء مناطق شاسعة من البلاد بالشمس والرياح، ومن المتوقع أن تبلغ قدرات التوليد المركبة مع نهاية عام ٢٠١٠، ٢٦٧٥٠ ميغاوات منها ٥٥٠ ميغاوات من مزارع الرياح، ١٤٠ ميغاوات من محطة الكريكات الشمسية، والتي ستبدأ عملها في أواخر عام ٢٠١٠.

أما إذا تكلمنا عن الطاقة الشمسية، فإن اقتصادياتها مازالت محل تساؤل مقارنة بالبدائل الأخرى، ورغم هذا يسعى قطاع الكهرباء إلى الحصول على حزمة تمويلية لإنشاء واحدة من أربع محطات شمسية حرارية على مستوى العالم يجرى حاليًا إنشاؤها بقدرة إجمالية تصل إلى ١٤٠ ميغاوات ليبدأ الإنتاج منها في القريب العاجل... وهكذا فإن البدائل متاحة، وبدء اللجوء إلى المحطات النووية أسبابه معروفة تعود إلى أن ما لدينا من وقود أحفوري - بل ما لدى العالم أجمع - آخذ في النضوب، إلى جانب أن البلاد قد استنفدت كل المصادر المائية.

من هنا كانت أهمية البحث عن مصادر بديلة وملائمة للطاقة، ومن هنا تتبع أهمية هذا الكتاب الذي يتقصى بالتحليل والتفصيل مصادر الطاقة غير التقليدية.

وبمقدور مصادر الطاقة غير التقليدية أن تحل مشكلتين متلازمتين من مشاكل الإمداد بالطاقة، فهي من جهة تحقق اللامركزية في التزويد بها، ومن جهة أخرى تسهم في المحافظة على نظافة البيئة، وتقف إلى جانب مصادر الطاقة التقليدية الآيلة للنفاذ وتتولى الوفاء باحتياجات المناطق الريفية.

وإذا كان الكتاب - وكاتباه هنديان - يتسم بالتركيز الشديد على ظروف الهند وملابسات البيئة فيها، فما من ريب في إمكانية تطبيق الكثير والكثير جدًا من



معطياته على مصر باعتبارها بلدًا ناميًا، تربط ظروفها بظروف الهند وشائج قوية، وما من شك في أن الهند في نهضتها الحديثة التي برزت بها لمقدمة الدول المتطلعة للحاق بركب الدول المتقدمة، تنهض مثلاً لما يمكن أن تتأثره مصر وتترسم خطواته في هذا السبيل الذي قطعت فيه الهند شوطاً لا يستهان به، وكما يتضح من الكتاب، فقد بلغ من اهتمام الهند بهذه القضية أن قامت بها في عام ١٩٨٢ إدارة خاصة، ما لبثت أن تحولت إلى وزارة مستقلة، ترعى شؤون الطاقة غير التقليدية والمتجددة... وتتضمن نشاطاتها الرئيسية وضع برامج لتطوير الاستفادة من الطاقة الشمسية وطاقت الرياح والمحيطات، والطاقة من الهيدروجين، ومن المصادر الحيوية والكيميائية من الفضلات والغاز الحيوى وإعادة تدوير النفايات والطاقة المغناطيسية - الهيدروديناميكية وغيرها.

وتولى برامج ومخططات الاستفادة من مصادر الطاقة الجديدة والمتجددة عناية خاصة لاستثمار التعاون مع منظمات المجتمع المحلية وتلبية احتياجاته ذات الحجم المحدود من القدرة للأغراض من قبيل الطهي والتزويد بالمياه لأغراض الشرب والرى والاستعمالات المنزلية، إلى جانب إنارة الطرقات، وقد أثبتت تلك البرامج فاعليتها بصفة خاصة في توفير نوع من الرفاهية للقطاعات المحرومة من المجتمع.

المترجم

عاطف يوسف محمود







## مقدمة الطبعة الثانية

إنه لمن دواعي سرورنا أن نقدم طبعة ثانية من الكتاب... وهي طبعة منقحة ومزينة وشاملة... ولقد أتاحت لنا هذه الطبعة الحديثة الفرصة لإدخال تحسينات ذات بال على الطبعة الأولى، وإضفاء منظور جديد على الكتاب... وقد أضيفت في هذه الطبعة بضعة رءوس موضوعات جديدة بناءً على رغبة الطلاب واحتياجاتهم، إذ أننا نتلقى التعليمات والاقتراحات من المعلمين والطلبة من مختلف الجامعات عبر بلاد الهند كلها، ولقد وجدنا لها فائدة كبيرة في الارتقاء بمادة الكتاب.

إننا لنعرب عن شكرنا الصادق وامتناننا العميق إلى السيد "سرى سوميا جوبتا"، العضو المنتدب لدار نيوإيدج إنترناشيونال (New Age International) بنيودلهي لإصدار الكتاب في هذا التوقيت الملائم وهذه الصياغة المناسبة.

المؤلفان





## مقدمة الطبعة الأولى

احتياجات الهند من الطاقة ضخمة ومتزايدة دائماً، ولا يصل استهلاك الطاقة التجاري للفرد الواحد بها إلى عشر المتوسط العالمي... وصورة الطاقة في الهند اليوم هي خليط مترابط من مصادر متنوعة يجري استغلالها لتلبية احتياجات متنوعة في المناطق الحضرية والريفية... ومن المتوقع أن يستديم هذا الاستغلال لمصادر الطاقة التقليدية وأن يستمر في التنامي في الهند، على أن هناك العديد من العوامل التي تحد من ذلك، مثل محدودية الاحتياطي المؤكد منها ونوعية المنتج، والاحتياج لتمويل وسائل المواصلات والتقليل من التلوث البيئي، ولقد تم التحقق من أنه في بلد كالهند تتعاضد أهمية استغلال مصادر الطاقة غير التقليدية، وقد بدئ في السنوات الأخيرة في استخدام تقنيات معينة من الطاقة غير التقليدية، لتأخذ مكانها في الهند، التي تتمتع بمصادر وفيرة للطاقات المتجددة، كالطاقة الشمسية، والرياح، والطاقة من الكتل الحيوية والمحيطات... وهذا الكتاب عن مصادر الطاقة غير التقليدية ينحو إلى شرح هذه الاستخدامات للطلبة خاصة درجات البكالوريوس والماجستير، ولقد تم التركيز على أساسيات الطرق الرئيسية للتحويل المباشر للطاقة.

وبودنا أن نعرب عن عميق شكرنا وامتناننا للناشر "تيو إيدج إنترناشيونال" بنيودلهي على إخراجها للكتاب في هذه الصورة الطيبة.

ونحن نرحب - ترحيباً قلبياً - بالاقتراعات من المعلمين والطلبة لإدخال المزيد من التحسينات على الكتاب مستقبلاً.

المؤلفان





**الباب الأول**

**مصادر الطاقة**





## مقدمة:

الطاقة عنصر حاكم فى النمو الاقتصادى، فهناك ارتباط وثيق بين توفر الطاقة المتاحة، والنمو المستقبلى لأمة ما، وعلى أية حال، قفى بلد نام كالهند، كلما زاد توفر الطاقة المتاحة، تعاظم الاحتياج إليها، وبالتالي فعلى الرغم من الزيادة فى القدرة الكهربائية المولدة من ٢٠٠٠ ميجاوات فى عام ١٩٥٠ إلى ٩١١٩٠ ميجاوات بحلول نهاية عام ٢٠٠٠، فإنه من المتوقع أن تصل الذروة فى العجز إلى ٣٠%.

تستهلك الطاقة من مختلف الأشكال فى الهند، والمصادر التقليدية للطاقة (خشب الوقود، ومخلفات الحيوانات والبقايا الزراعية) ما زالت تمثل الكم الأكبر فى تلبية الاحتياجات إلى الطاقة فى مناطق الهند الريفية، وبالتدريج، تحل أنواع الوقود التجارية كالفحم، والليجنايت، ومشتقات البترول، والغاز الطبيعى، والكهرباء، محل هذه الأنواع غير التجارية من الوقود، وتشكل أنواع الوقود التجارية زهاء ٦٠% من إجمالى المنتج من الطاقة الابتدائية فى الهند، فى حين تغطى النسبة الباقية (٤٠%) أنواع الوقود غير التجارية، ومن بين الطاقة التجارية الإجمالية المنتجة فى شكل قدرة أو كهرباء، يأتى ٦٩% من الفحم ومصادر القوى الحرارية، ٢٥% من القوى المائية، و٢% من الطاقة النووية، و٤% من زيت الديزل (السولار) والغاز، وأقل من ١% من مصادر الطاقة غير التقليدية كالطاقة الشمسية، والرياح، والغازات الحيوية، ومحطات الكهرباء المائية متناهية الصغر، أما البترول ومشتقاته، فهى المصدر الكبير الآخر للطاقة.

لقد صاغت حكومة الهند - فيما يخص الطاقة - سياسة تهدف لتأمين إمداد كافٍ من الطاقة بالحد الأدنى من التكلفة، مع تحقيق الاكتفاء الذاتى من إمدادات الطاقة، وحماية البيئة من التأثيرات السلبية للاستغلال الجائر على مصادر الطاقة، وترسم البنود التالية الملامح الرئيسية لهذه السياسة:

أ - التعجيل باستغلال مصادر الطاقة التقليدية المحلية: خام البترول، والفحم، والقدرات الهيدروليكية والنووية.

ب- تكثيف عمليات الاستكشاف لزيادة الإنتاج المحلى من خام البترول والغاز الطبيعى.

ج- السيطرة على الطلب على خام البترول وصور الطاقة الأخرى.

د- المحافظة على استهلاك الطاقة وحسن القيام على إدارتها.

هـ- تحقيق الاستغلال الأمثل للطاقات الموجودة بالبلاد.

و- تطوير سبل الاستفادة من مصادر الطاقة المتجددة لمجابهة الاحتياجات فى المجتمعات الريفية.

ز- تكثيف المصادر وتطوير الأنشطة فى مجالات مصادر الطاقات الجديدة والمتجددة.

ح- التدريب المنسق للعمالة المنوط بها قطاع الطاقة على مختلف المستويات الإدارية.

إن تطوير بدائل مصادر الطاقة غير التقليدية وتنميتها، سواء الجديدة أو المتجددة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الحيوية... إلخ، تحظى باهتمام ودعم إدارة مصادر الطاقة غير التقليدية التى تأسست بالهند عام ١٩٨٢.



## تصنيف مصادر الطاقة:

### ١ - مصادر الطاقة التجارية أو غير التجارية:

تشمل أصناف الوقود التجارية:

الفحم، والليجنايت، ومشتقات النفط، والغاز الطبيعي، والكهرباء.

وتشمل أصناف الوقود غير التجارية:

خشب الوقود، وروث الأبقار، ومخلفات الزراعة.

### ٢ - مصادر الطاقة التقليدية أو غير التقليدية:

تشمل المصادر التقليدية:

أنواع الوقود الأحفوري<sup>(\*)</sup> (الفحم - خام البترول - الغاز الطبيعي) والطاقات المائية والنووية.

تشمل المصادر غير التقليدية (أو الطاقة البديلة):

الطاقة الشمسية - الطاقة الحيوية - طاقة الرياح والمحيطات - طاقة الهيدروجين - وطاقة الحرارة من باطن الأرض (الجيوحرارية).

### ٣ - مصادر الطاقة إما متجددة أو غير متجددة:

مصادر الطاقات المتجددة:

تشمل المصادر الطبيعية للطاقة، والتي لا تستنفد، ويمكن استعمالها لإنتاج الطاقة لعدد من المرات، ومن أمثلتها الطاقة الشمسية، وطاقة الرياح، وطاقة

---

(\*) يقصد بها تلك المنتجة من بقايا كائنات حيوانية أو نباتية ترجع إلى عصور جيولوجية سالفة. (المترجم)

حرارة باطن الأرض، وموجات المد والجزر، وطاقة المياه، والطاقة الحيوية، والمواد المعدنية الذرية مصادر غير مستفدة من الطاقة، عند استخدامها في تكنولوجيات تفاعلات المولدات السريعة.

#### مصادر الطاقة غير المتجددة:

تشمل المصادر الطبيعية التي تُستفد ولا يمكن الإحلال محلها عند استعمالها، وأمثلتها أنواع الوقود الأحفوري كالفحم وخام البترول والغاز الطبيعي، والتي تمثل حاليًا ٩٨% من مصادر الطاقة.

#### الفحم:

الفحم هو المصدر الأولي للطاقة، ويمثل حوالي ٦٧% من احتياجات بلاد الهند من الطاقة التجارية، ويستعمل بشكل جوهري في الصناعات المعدنية والكيميائية، وتشكل القدرة الحرارية المنتجة من نوعيات الفحم متدنية الرتبة نحو ٥٢% من إجمالي الطاقة المركبة لتوليد الكهرباء بالبلاد.

تتكون رواسب الفحم من مواد متطايرة، ورطوبة وكربون إلى جانب ما يحتويه من شوائب (رماد).

وتتنمى ترسيبات الفحم في الهند إلى الحقبتيين الجوندوانية والحقبة الجيولوجية الثالثة (٩٨% من مصادر الفحم تنتمى إلى الحقبة الجوندوانية)، ويقع حوالي ٧٥% من ترسيبات الفحم في وادي نهر "دامودار". والأماكن المرتبطة جيدًا بهذه الترسيبات هي رانيجانج في البنغال الغربية وجاريا، وجيريديه، وباكورا وكرانبورا في بيهار، وأودية الأنهار الأخرى التي بها ترسيبات فحمية تشمل جودوفاري وماهانادي وسون وواردها، وتوجد مناجم الفحم الأخرى في نطاق

ساتبورا في سهول تشاتيسجاره، بمادهايا براديش، كما أن هناك حقولاً ضخمة للفحم في سينجاراني بأندهار ابراديش، وتالشر بأوريسا، وشاندا في ماهار اشترا أيضاً.

بدأت صناعة تعدين الفحم بالهند في رانيجانج بغرب البنغال في سنة ١٧٧٤، وقد تم تأميم نشاط تعدين الفحم في الفترة ١٩٧٢ - ١٩٧٣، تحاشياً لاستغلال العمالة. وينتمي نشاط إنتاج الفحم حالياً للقطاع العام بأكمله تقريباً، ويجرى تنظيمه من خلال "شركة الهند المحدودة للفحم"، وهي شركة قطاع مشترك بين الحكومة المركزية وحكومة أندهار ابراديش.

### الاحتياطيات والإنتاج:

قدرت هيئة GSI (\*) احتياطيات الهند من الفحم (حتى عمق ١٢٠٠ متر) بحوالي ٢٠١٩٥٣,٧ مليون طن، وذلك في أول يناير من عام ١٩٩٦، حوالي ٢٧% منها من النوعيات القابلة للتكويك، ٧٣% منها من غير القابلة له، وبالنظر إلى محدودية المتاح من الفحم القابل للتكويك فإن استخدامه مقصور على الأغراض الميتالورجية، في حين أن الأنواع غير القابلة للتكويك متاحة بالبلاد، وملائمة لأغراض توليد الطاقة، والولايات المتعارف على وجود احتياطيات من الفحم بها تشمل بيهار، والبنغال الغربية، ومادهايا براديش، وأوريسا، وأندهار ابراديش، وماهار اشترا.

ولقد ارتفع إنتاج الفحم إلى حدود ٢٧٠,١٢ مليون طن تقريباً في عام ١٩٩٥ - ١٩٩٦، مقارنة بزهاء ٧٨,١٧ مليون طن في وقت تأميم صناعة الفحم في عام ١٩٧٣ - ١٩٧٤، والهند تصنف بأنها ثالث أكبر منتج للفحم على مستوى العالم، وبهذا المعدل فمن المتوقع أن تفي الاحتياطيات بالاحتياجات لمدة ٢٠٠ سنة، لذا كان من المحتم أن يحافظ على الفحم ويجرى استعماله بصورة انتقائية.

---

(\*) GSI هي هيئة المساحة الجيولوجية الهندية Geological Survey of India (المترجم)



## تصنيف أنواع الفحم:

يصنف الفحم اعتمادًا على نسبة محتواه من الكربون الثابت Fixed carbon<sup>(\*)</sup>، والرطوبة، والمواد المتطايرة في ترتيب تنازلي كالاتي:

أ - الفحم الأنثراسيتي.

ب - الفحم البتيوميني.

ج - الفحم البتيوميني السيني (Senic).

د - الليجنايت أو الفحم البني اللون.

كما تصنف أنواع الفحم طبقًا لنسبة المادة المتطايرة إلى فئتين:

أ - فحم قليل المواد المتطايرة: تتراوح نسبة المواد المتطايرة فيه ما بين ٢٠، ٣٠% مع انخفاض نسبة الرطوبة، ويعرف بصفة عامة بالفحم القابل للتكويك (Coking coal) ولهذه الفحمات خواص تكويك جيدة، وتصل نسبة الشوائب بها إلى ٢٤%، وتستخدم - سواء تم إثراؤها أو لم يتم - في صناعة الكوك الصلب المطلوب للأغراض الميتالورجية.

ب - فحم عالي المواد المتطايرة: يحتوي على نسبة عالية من المواد المتطايرة، تربو على ٣٠%، ونسبة رطوبة في حدود ١٠%، وهو فحم سريع الاحتراق يصلح في الأساس لإنتاج بخار الماء، ويعرف عادة بالفحم غير القابل للتكويك ويستخدم في الصناعات التي تلزمها عمليات تسخين أو توليد بخار الماء، كمحطات القوى الحرارية والقاطرات البخارية ولحرق الطوب في الصناعات الكيماوية، وكوقود منزلي.

---

(\*) يقصد بها كمية الكربون والمواد الصلبة القابلة للاحتراق في المواد الفحمية بعد نزع الرطوبة والرماد والمواد المتطايرة منها (المترجم)

## الليجنائيت:

يُطلق على الليجنائيت أيضًا مسمى الفحم البنى اللون، وهو ذو رتبة متدنية ويحتوى على نسبة أعلى من الرطوبة، وإذا تعرض للتحلل فإنه يتحلل بسهولة، ولذا فإنه - قبل استعماله - يشكل فى هيئة قوالب صغيرة، ويستخدم أساسًا فى محطات توليد القوى الحرارية وكوقود صناعى ومنزلى، وكذلك فى عمليات الكربنة وإنتاج الأسمدة.

يحتوى الليجنائيت الهندى على نسبة شوائب أقل من الموجودة بالفحم، وهو متجانس فى خواصه.

وتتواجد ترسبات الليجنائيت ذات الأهمية فى كل من تاميلنادو، وبونديشيرى، وأوتار براديش، وكيرالا، وراجاستهان، وجامو، وكشمير. وتقدر احتياطات الليجنائيت ببلاد الهند بحوالى ٢٧٤٠٠ (\*) مليون طن، والترسبات فى نيفيلى بتاميلنادو بحوالى ٣٣٠٠ مليون طن، وتكون ٩٠% من احتياطات الليجنائيت، لكن المناجم تعانى من تركيبها الارتوازى، وعملية الضخ المستمر للماء مهمة شاقة وجسيمة، غير أن موقع هذه الترسبات يعتبر بمثابة النعمة لتاميلنادو، فهى تنتج ٦٠٠ ميجاوات من القدرة الحرارية، ويعتمد تصنيع الإقليم بقدر كبير على القدرة الحرارية المولدة من حقل الليجنائيت فى نيفيلى، ويبلغ الإنتاج السنوى من هذا المنجم المفتوح قرابة ٦,٥ مليون طن.

## مشاكل تعدين الفحم:

### تشمل الآتى:

أ - محدودية احتياطات الهند من الفحم الميتالورجى، ورغم ذلك فإن استتقاز النوعيات عالية الجودة والمناسبة لصناعة الكوك، ما زالت قليلة (حوالى ٧٠ إلى ٨٠%)، وبالوسع زيادتها بميكنة عمليات التعدين.

---

(\*) الأرقام كما وردت بالنص الأصلي. (المترجم)

ب - تقع معظم ترسبات الفحم فى مناطق شرق الهند ووسطها، فى حين تتوزع محطات القوى الحرارية وغيرها فى مواقع الاستهلاك على مدى واسع من الانتشار، مما يقتضى نقل الفحم عبر مسافات شاسعة.

ج- حيث إن معظم مناجم الفحم تعتبر بمقياس الحجم صغيرة، فإنها تطبق أساليب بدائية فى الإنتاج، ومن ثم فإن الإنتاج لكل فرد ليس فقط متدنياً، ولكن بكلفة إنتاج بالتبعية مرتفعة.

د - الكميات الكبيرة من الشوائب التى يسمح ببقائها فى الفحم تقلل من جودته، إلى جانب أثرها فى رفع تكلفة نقل الفحم وإحداث الإضرار بالبيئة، ويمكن تحاشيها بعمليات غسل الفحم.

هـ- يحدث فقدان كمية كبيرة من الفحم فى صورة نفايات، تبقى بعد فصل الفحم ويتم الاستغناء عنها، وبالإمكان تجنب هذه الفوائد إذا حول تراب الفحم أو مسحوقه إلى قوالب صغيرة.

و - النقص فى القدرة فى بعض المناطق، وعلى وجه الخصوص منطقة وادى دامور DVC<sup>(\*)</sup>، ويعد عدم توفر المتفجرات والاضطرابات العمالية، ومن المشاكل الخطيرة التى تواجه هذه الصناعة.

### المحافظة على الفحم:

مصادر الفحم فى الهند فقيرة، سواء فى النوعية أو الكمية، ويزيد هذا الموقف صعوبة، سوء استخدام الفحم الجيد بالحرق فى وسائل النقل أو بالصناعات، و يرجح ألا تكفى الاحتياطات القليلة من فحم التعدين أو من فحم التكوين لأمد طويل، كما أن التعدين الانتقائى يؤدى إلى فاقد جسيم فى الفحم الخام،

---

(\*) اختصار لعبارة Damaur Valley وهى منطقة تنمية صناعية شهيرة بالهند. (المترجم)



مع حدوث اشتعال للنيران من وقت لآخر بالمناجم وخاصة مع اتباع أساليب غير نظامية في استخراج وتعدين الفحم، لذا فمن الجوهري بمكان الاهتمام بالمحافظة على الفحم واستخدامه بطريقة مرشدة تم اختيارها على نحو سليم.

إن إدارة الفحم هي العامل المحوري في إحداث التنمية ومع ترشيد استغلال الاحتياطات من الفحم والليجنائيت في الهند، ويتأكد الترشيح في استهلاك الفحم باسترجاع الاحتياطات في موضعها الأصلي أو الحقيقي، ولقد استدعت ظروف التعدين الصعبة من حيث طبيعة نوع الأرض، والتي تسود المناطق المتواجد بها الفحم، إدخال البعض من أحدث أنواع التقنيات الملائمة لاستغلال مثل هذه الترسبات، من وجهة نظر الحفاظ للفحم والسلامة الصناعية، ومن وسائل الترشيح الأخرى الفحم التي يمكن استعمالها أو اتباعها:

أ - التحفظ على فحم التكوين للاستخدام فقط في الصناعات التعدينية، مع عدم استخدامه على الإطلاق، أو قصر استخدامه لتوليد البخار أو للنقل أو لأية صناعة أخرى على حالات الضرورة القصوى.

ب- رفع جودة الفحم من الرتبتين الثانية والثالثة، عن طريق غسيله أو مزجه بالفحم من الرتبة الأولى - فحم التكوين - ثم استخدامه في الصناعات التعدينية.

ج- اتخاذ الإجراءات الفعالة لوقف عمليات التعدين الانتقائي.

د - استكشاف مناطق جديدة بحثاً عن احتياطات الفحم، مع تقييمها.

هـ- حرق الفحم المحتوي على نسب عالية من شوائب، بعد فصله بطريقة الحمل بالموائع.

و - تخصيص الفحم مما لا ينبعث منه دخان للاستعمال المنزلى، وذلك بـكربنته.

ز - استخدام مسحوق الفحم ونفاياته بعد تشكيله فى قوالب بواسطة القطران أو بخليط من القطران والجير.

ح - الاستعاضة عن خام البترول بالفحم المحول لغاز أو المسال بطريقة فيشر تروبش التصنيعية Fischer- Tropsch synthesis<sup>(\*)</sup>.

ط - معالجة الفحم المعدن بطريقة المنجم المفتوح.

ى - التحويل المباشر للحرارة الناجمة عن احتراق الفحم إلى كهرباء بالمغناطيسية الهيدروديناميكية<sup>(\*\*)</sup>.

ك - نقل الفحم وهو فى صورة غليظة القوام لتقليل نفقات النقل.

## النفط والغاز الطبيعى:

### النفط:

النفط سائل قابل للاشتعال مكوناته الأساسية هى الهيدروكربونات (من ٩٠ إلى ٩٨%)، فى حين تتكون النسبة الباقية من مركبات عضوية يدخل فيها الأكسجين، والنيتروجين والكبريت وآثار من مركبات عضوية - معدنية، ويستخدم النفط والمشتقات البترولية، كوقود للمحركات وكزيوت، وكمصدر للمواد الخام اللازمة لتصنيع الكيماويات المتنوعة المطلوبة فى الصناعات المختلفة.

---

(\*) تصنيع الهيدروكربونات بدرجة أول أكسيد الكربون بمعاونة عامل مساعد. (المترجم)

(\*\*) يرجى الرجوع للباب السابع. (المترجم)

## أماكن الوجود:

يوجد النفط الخام في الهند بصفة أساسية مصحوبًا بالصخور الرسوبية من الحقبين الميزوزينية(\*) والعصر الجيولوجي الثالث، والتي كانت يوما ما مطمورة تحت البحار الضحلة، وتقدر مساحة الطبقات الحاملة للزيت في الهند بأكثر من ١,٥ مليون كيلو متر مربع (حوالي ٥/٢ مساحة البلاد الكلية)، وهذه المساحات تغطي السهول الشمالية في وادي جانجا براهما بوترا، وفي الشريط الساحلي، وكذلك الحافة القارية البعيدة عن الساحل، وفي سهول جوجارات، وكذلك صحراء ثار، وفي المنطقة حول جزر أندامان ونيكوبار.

## الاستكشاف وإدارة الإنتاج:

بدأ نشاط استكشاف النفط وإنتاجه بصورة كثيفة ومنسقة بعد تأسيس لجنة النفط والغاز الطبيعي (ONGC) في ١٩٦٥، وهي ما تسمى الآن بالمؤسسة الهندية المحدودة للنفط (OIL)، والتي تكونت بعد اقتناء الحكومة لأسهم "شركة بورما للنفط" في عام ١٩٨١، فصارت ثاني مؤسسة قطاع عام تتخبط في مجال استكشاف النفط وإنتاجه في البلاد.

وحتى استقلال البلاد في عام ١٩٤٧، كانت أسام هي الولاية الوحيدة التي تحفر بها الآبار لاستخراج النفط وتكريره في معمل تكرير في مقاطعة "ديجبوى"، ورغم صغر حجمه فقد كان هذا هو حقل الزيت الوحيد الذي استمر استغلاله على مدى ١٠٠ عام دون توقف... وبعد الاستقلال ظهرت دلائل وجود ترسبات هيدروكربونية في سهول جوجارات ومنطقة كامباي (بعيدًا عن الشاطئ).

---

(\*) الدهر الوسيط من الحقبة الجيولوجية الثالثة. (المترجم)



على أن الاحتياطيات الكبرى وجدت - على غير المتوقع - بعيداً عن سواحل بومباي، فيما يسمى "بومباي هاى"، على مسافة ١٥ كم من الشاطئ، وحتى الوقت الحالى تُعدّ هذه أغنى حقول النفط فى الهند.

### التوزيع:

يوجد فى الهند ١٣ حوضاً ذات أهمية، تحتوى على طبقات حاملة للنفط، يمكن تبويبها فى ثلاث مناطق:

أ - حوض كامباي فى جوجارات، وحوض حزام أسام أراكان، وحوض بومباي الأرضى بعيداً عن الساحل، وجميعها أحواض يجرى الإنتاج التجارى منها.

ب - أحواض فى راجاستهان، كريشنا، كوفيرى، جودافارى، أندامان، البنغال، وتلال الهيمالايا، وادى جانجا وتريبورا، حزام ناجالاند فولد، ومن المعروف أن جميعها تحتوى على طبقات حاملة للنفط، لكن الإنتاج على المستوى التجارى من هذه المناطق لم يبدأ بعد.

ج- التكوينات الجيولوجية فى مناطق كوتش - ساوراشترا، كيرالاكونكان، ومهانادى، ولها تركيبات جيولوجية تبشر بتواجد النفط، ومن ثم يمكن اعتبارها مناطق محتملة فى المستقبل.

### الاحتياطيات والإنتاج:

تقف الاحتياطيات المؤكدة للنفط على مستوى العالم فى أول يناير عام ١٩٩٥ عند حدود ٩٩٩,٧ بليون برميل، بينما يتأرجح إنتاج النفط حول معدل ١٩ - ٢٢ مليون<sup>(\*)</sup> برميل سنوياً، وبمقارنة هذين المؤشرين (الاحتياطى والإنتاج)

---

(\*) كما ورد بالأصل وصحتها بليون. (المترجم)

يتضح أن احتياطات العالم من النفط تكفى لمدة حوالى ٤٥ عامًا، أما فى الهند فإن احتياطات النفط فقيرة جدا، أو محدودة بحوالى ٧٣٩ مليون طن، وذلك فى أول يناير عام ١٩٩٦، وهى فى سبيلها للنفاذ فى غضون ١٥ - ٢٠ سنة. لقد زاد الإنتاج المحلى من ٠,٢٥ مليون طن فى عام ١٩٥٠ إلى ٣٥ مليون طن فى عام ١٩٩٥ - ١٩٩٦، ووصل إنتاج الزيت حدًا أقصى قدره ٣٤,٥ مليون طن فى عام ١٩٨٩ - ١٩٩٠، ثم انخفض إلى ٢٧ مليون طن خلال عام ١٩٩٢ - ١٩٩٣، ويعزى هذا بصورة كبيرة إلى إغلاق آبار الزيت التى استنفدت فى إقليم "بومباى هاى"، ومنذ ذلك الوقت زاد الإنتاج أساسًا بسبب وضع مخططات التطوير الرئيسية موضع التنفيذ، مثل التطوير الإضافى فى حقل نيلن (ل - ٢)، (ل - ٣)، وحقل جنوب هيرا بعيدًا داخل البحر صوب الساحل الغربى، ومن المخطط رفع الإنتاج إلى ٥٠ مليون طن سنوياً.

ويمثل النفط الخام المستخرج من الآبار البحرية فى "بومباى هاى" زهاء ٧٥% من الإنتاج المحلى.

ويوجه نحو ٤٠% من إجمالى الاستهلاك المحلى من المنتجات البترولية إلى قطاع النقل، بينما تستخدم نسبة ٦٠% الباقية فى الصناعة بما فى ذلك توليد الطاقة، وكذلك الاستخدامات المنزلية وغيرها من الأغراض الأخرى.

### مصافى التكرير:

يجرى تكرير البترول فى الهند فى ١٣ مصفاة تكرير تتبع كلها القطاع العام، وتصل طاقتها التكريرية الإجمالية السنوية إلى ٦٠,٤ مليون طن (إحصاء يونيو ١٩٩٦)، وهذه المعامل هى:

معمل باراونى (بيهار - مؤسسة للهند النفط)، بونجايجاون (ولاية أسام - مصفاة تكرير بونجايجاون)، كوتشين (ولاية كيرالا - مصفاة تكرير كوتشين)،

ديجبوى (ولاية أسام - مؤسسة الهند للنفط)، هالديا (ولاية غرب البنغال - مؤسسة الهند للنفط)، كوفالى (ولاية جوجارات - مؤسسة الهند للنفط)، مانالى وناريمانام (مدراس - مصفاة تكرير مدراس)، ماتهورا (مؤسسة الهند للنفط)، نونماتى فى جواهاتى (ولاية أسام - مؤسسة الهند للنفط)، ترومباى (بومباى - هندوستان للبترول)، ترومباى (بومباى - بهارات للبترول)، فيساكها باتنام (أندھرا براديش - هندوستان للبترول)، وجرى إنشاء مصفيتين للتكرير جديدتين فى مانجالور (كارناتاكا) وبانيبات (هاريانا)، وكلاهما يتبع القطاع المشترك.

### مواطن المشاكل:

أ - الاعتماد المتزايد على الواردات من النفط والمنتجات النفطية، مما يجعلها عرضة لتقلبات أسعار النفط العالمية، وقد شكلت واردات النفط ٤٤% من الاستهلاك المحلى ومثلت بالقيمة الحسابية ٢٧% من إجمالى الواردات لعام ١٩٩٥ - ١٩٩٦، ويزيد هذا أيضاً من الشعور بالقلق فيما يخص التأمين القومى من النفط.

ب- تجمد الإنتاج المحلى من النفط الخام لبضع سنوات، بل واتجاهه إلى الانخفاض.

ج- منذ العثور على منابع "بومباى هاى" فى ثمانينيات القرن العشرين لم يتم العثور على أى حقول نفط ذات أهمية.

د - يخضع تسعير المنتجات النفطية للظروف السياسية، ونظامه سلىء بالعيوب.

## المحافظة على المنتجات البترولية:

تُحظى مسألة الحفاظ على المنتجات البترولية بأولوية عالية، ولقد اتخذت الإجراءات التالية من قبل "هيئة بحوث الحفاظ على البترول" (PCRA) والتي تعمل تحت سلطة وزارة البترول والغاز الطبيعي، للحفاظ على المنتجات البترولية:

- أ - خلق وعي عام إزاء الحاجة إلى الحفاظ على المنتجات البترولية.
  - ب- تطوير الإجراءات لكبح السلوكيات التي تؤدي إلى ارتفاع الفاقد.
  - ج- تحسين كفاءة استغلال النفط في المعدات والأجهزة ووسائل المواصلات.
  - د- تنشيط البحوث والتطوير لتحسين كفاءة استغلال النفط في استخداماته النهائية المتنوعة.
  - هـ- تطوير بدائل استبدال أنواع الوقود، مثلما أدخل الغاز الطبيعي المضغوط (CNG) كوقود بديل في قطاع النقل البري.
- ولتدعيم سبل تأمين الطاقة وبهدف التأكد من توفير المنتجات البترولية عبر البلاد كلها، بأقل كلفة ممكنة وعلى أسس منتظمة، انتهجت الحكومة إستراتيجية من النقاط الأربع التالية:

أ - استكشافات خارج البلاد: ستقوم شركات النفط والغاز الوطنية باستكشافات خارج البلاد مما سيتيح لها حصيلة من العملة الأجنبية اللازمة لشراء النفط .

ب- معامل تكرير جديدة: حيث سيسمح للبلاد المصدرة للبترول بإقامة معامل تكرير جديدة في البلاد، وهو ما تقوم به حالياً هيئات النفط والبترول في عمان والكويت.



ج - شبكة من خطوط الأنابيب: لتأمين النقل السريع والحر للنفط لابد من بناء شبكة من خطوط الأنابيب، مما سينعكس أثره على توفير نفقات النقل.

د- الاحتياطات الإستراتيجية: تهدف وزارة البترول إلى تدبير احتياطي لمدة ٤٥ يومًا في مناطق معينة. ومن خلال ذلك يمكن للبلاد أن تواجه أى نقص وقى محتمل فى البترول.

### الغاز الطبيعي:

يتواجد الغاز الطبيعي إما مفردا وإما مصحوبا بالزيت الخام، غير أن معظم المستخرج منه يأتى من المنابع المصحوبة بالزيت الخام. وتمتد احتياطات الغاز الطبيعي فى تريبورا وراجا ستهان، وبالتقريب فى جميع حقول النفط داخل البحر فى كامباى - جوجارات، وبومباى هاى، وتاميلنادو، وأندھرا براديش، وأوريسا.

وفى بلاد تعاني من نقص الطاقة - كالهند، يعد الغاز الطبيعي بمثابة هبة غالية. ويمكن استخدامه سواء كمصدر للطاقة (فى المحطات الحرارية) أو كمادة خام تدخل فى صناعة البتروكيماويات. ويحتاج بناء محطة القوى القائمة على الغاز الطبيعي إلى فترة أقل. وفيما يخص الزراعة فى الهند، فهناك مجال لتعزيز الإنتاج عن طريق إقامة مصانع للسماذ تعتمد على الغاز الطبيعي. وتتجلى أفضلية اللجوء إلى الغاز فى سهولة نقله خلال أنابيب ويجرى حاليا نقل الغاز من حقوله فى بومباى وجوجارات إلى ولايات مثل مادها براديش، وراجا ستهان، وأوتار براديش. وقد عهد إلى منظمة الغاز الهندية المحدودة (GAIL)، والتي تأسست عام ١٩٨٤ لنقل الغاز الطبيعي ومعالجته وتسويقه، بمهمة ذات أولوية، وهى إنشاء خط مواسير غاز عبر البلاد يمر بها جيرا - بيجابور - جاجا ديشبور، ويبلغ طوله ١٧٣٠ كيلو مترا ويحمل ١٨ مليون متر مكعب من الغاز الطبيعي يوميا. ومن

المخطط أن يغذى ستة مصانع للسماد وثلاث محطات قوى، حيث سيبدأ الخط من نقطة هازيرا في جوجارات بيجابور ومنه يمتد خط في اتجاه ساوايماد هوبور في راجا ستهان (مادهيا براديش وجاجديشبور) وينتهى في أوتار براديش. وخط الأنابيب هذا هو جزء من مشروع سيغطي شبكة الغاز الجنوبية، وهو مفهوم يخطط لنقل فائض الغاز من الحقول الغربية (البعيدة عن الساحل) إلى الولايات الجنوبية ويعززه بقدر ما هو متاح ومجد المتوفر الإضافي من الغاز المقترح استيراده من الشرق الأوسط، حيث يقترح مد خط أنابيب غاز بطول ٢٣٠٠ كيلو متر من عمان إلى الهند، حيث يوزع الغاز على كل الولايات الجنوبية.

وطبقا لبيانات إبريل ١٩٩٤ تقف احتياطات الهند من الغاز المتاح الحصول عليه عند حدود ٧٠٠ بليون متر مكعب. ويصل حجم الطلب على الغاز الطبيعي حاليًا ٢٦٤ مليون متر مكعب يوميًا، وذلك في مقابل إنتاج إجمالي خلال ١٩٩٥ - ١٩٩٦ بلغ ٦١ مليون متر مكعب في اليوم فقط. ويعنى هذا وجود فجوة ضخمة ما بين الطلب والعرض فيما يخص الغاز الطبيعي في البلاد. وقد وصل الإنتاج خلال ١٩٩٥ - ٩٦ إلى ٢٠,٨٦ بليون متر مكعب. فإذا ما أخذ في الحسبان حجم الطلب المستقبلي واحتياطات الغاز المؤكدة، فإن هذا المخزون سينفذ فيما لا يزيد على العشرين عامًا.

### محطات القوى:

بدأت محطات القوى في الهند مع عام ١٩١٠، بتوريد محطة القوى الكهرومائية في سيفاسا مودرام بكارناتاكا. وقد زادت قدرات التوليد الكهربائية بصورة هائلة منذ الاستقلال، بيد أنها لم تقوَ على ملاحقة الطلب المتزايد طبقا لحركة التصنيع السريعة والتنمية الاجتماعية والاقتصادية والتحول صوب المجتمعات الحضرية. وقد ارتفعت قدرة التوليد المركبة من رقم متواضع عام ١٩٧٤ (١٤٠٠ ميجاوات) إلى ٨٣٢٨٨ ميجاوات خلال عام ١٩٩٥ - ٩٦، شملت

٢٠٩٢٦ ميجاوات من المحطات المائية، ٦٠٠٨٧ ميجاوات من المحطات الحرارية، ٢٢٢٥ ميجاوات من المحطات النووية. وتشكل المحطات الحرارية الآن ٢٤ % من إجمالي القدرة المولدة، على حين تمثل المحطات الكهرومائية ٢٤ % والباقي (٢%) يأتي من المحطات النووية.

وسواء كانت محطات القوى حرارية أو مائية، فهي أنسب صورة لتسخير الطاقة وأكثرها شمولاً، ويتعاضد احتياج الصناعة (الذي يمثل ٥٠ % من إجمالي استهلاك الطاقة) إليها، وتشكل الزراعة ٢٥ %، في حين تتوزع بقية الاستهلاك ما بين وسائل النقل والاستخدامات المنزلية والقطاعات الأخرى.

### محطات القوى الحرارية:

الفحم، والنفط والغاز الطبيعي هي المصادر الرئيسية لوقود المحطات الحرارية. وهي المصادر التي ترجع إلى أصل معدني، ومن ثم فإنها تسمى بالمثل بالوقود الأحفوري fossil fuel. ويعود عيبها الأكبر إلى أنها مصادر معرضة للنفاذ لا يمكن للإنسان تعويضها. وعلاوة على ذلك فلا يخلو استعمالها - على النقيض من الطاقة الكهرومائية - من أضرار تلوث البيئة.

وتقع محطات القوى الحرارية بالأساس في مناطق الصناعية الكبيرة وقرب حقول الفحم. ومن ضمن قدرة حرارية إجمالية مركبة لتوليد الكهرباء، تمثل "ماهاراشترا ١٤,١ %، والبنغال الغربية ١٣,٢ %، وأوتار براديش ١٢,٨ % وجو جارات ١٢,٢ % وبيهار ١٢ % وتاميل نادو ٩,٤ % ومادهايا براديش ٧,٨ % وأندرا براديش ٥,٩ % ودلهي ٥,٢ %. ولتطوير محطات القوى الحرارية، أسست الهيئة الوطنية للقوى الحرارية "NTPC" بنيودلهي في ١٩٧٥، كشركة قطاعية مركزية، الهدف منها تعزيز التوريد بالكهرباء عن طريق تشييد محطات قوى حرارية عملاقة، فبدأت بمشروع بقدرة ٢٠٠ ميجاوات في سينجر ولسي عام

١٩٨٢. واليوم تبلغ الطاقات المركبة عن طريقها ١٦٧٩٥ ميجاوات، تشكل زهاء ٢٨% من إجمالي طاقات الهند الحرارية. وقد نجحت الهيئة في توريد محطة قوى حرارية عملاقة في سينجر ولي، وكوربا، وراما جوندام، وفاراك، وفيندهياتشال، وريها ند، ودادري، وكاهالجاون وتلتشر، وكذلك خمسة مشروعات قوى بدورات غاز مركبة(\*) في أنتا (راجا ستهان) ودادري، وكاواس (جوجارات) وجاندهار (جوجارات).

### محطات القوى المائية:

تمثل طاقة الوضع في المسطحات المائية ببعض المناطق أرخص مصادر الطاقة وأكثرها أماناً ونظافة، والكهرباء المتولدة من طاقة المياه هي المسماة بالقدرة المائية. وبالنظر إلى محدودية مصادر الفحم والليجنائيت والنفط يتنامى باطراد الاتجاه إلى القوى المحركة المائية والنووية.

### المناطق الواعدة:

لدى الهند مخزون هائل متعارف عليه في قطاع القوى المائية لم يستغل بعد. والمواقع الصالحة لتوليد القوى المائية بالهند هي:

أ - أكثر المواقع أهمية يقع بامتداد سفوح جبال الهيمالايا في الغرب (أوتار براديش) و (هيما تشال براديش)، وفيه طاقة مؤكدة لم تستغل بعد قدرها ٥٠٠٠٠ ميجاوات.

ب- الإقليم الشمالي الشرقي به هو الآخر طاقات مائية هائلة.

---

(\*) في الدورة الحرارية المركبة تدمج أكثر من دورة بغرض رفع الكفاءة الحرارية باستغلال حرارة العادم الناتج من الدورة الأولى في دورة ثانية. (المترجم)

ج- الإقليم على امتداد غرب (جاتس) والذي يمر عبر ماهاراشترا وكارناتاكا وتاميلاندو وكيرالا.

د - الإقليم المار عبر ساتبورا وفيندهياس وماهاديو ومايكال بوسط الهند.

هـ- نطاق المحطات الحرارية والممتد من شرق ناجبور إلى الغرب، والذي يحفّ بمناجم الفحم في حزام (جوندوانا) .

#### تطور توليد القوى المائية:

أنشئت أول محطة قوى مائية بالهند عام ١٨٩٧ في (دار جيلنج)، وتبعها محطة ثانية في سيفاسا مودارام بكارناتاكا عام ١٩٠٢. وبلغت القدرة الكلية المركبة ٥٨٨ ميجاوات في عام ١٩٥١، ارتفعت إلى ٢٠٩٧٦ ميجاوات في عام ١٩٩٥ - ١٩٩٦

#### مزايا القدرة المائية:

باستثناء ضخامة الاستثمارات الابتدائية، تتمتع محطات القوى المائية بمزايا حاسمة مقارنة بطرق توليد القوى الأخرى، فمشروعات القوى المائية لا توفر فقط مصدراً رخيصاً للكهرباء ولكنها أيضاً متجددة بطبيعتها (فالماء مصدر متجدد دائماً وليس عرضة للنضوب). وبعبارة أخرى فتكاليف تشغيل مشروعات القوى المائية وصيانتها منخفضة للغاية، في حين أن تكلفة المدخلات في محطات القوى الحرارية (الفحم مثلاً) أعلى بكثير. وليس هناك مشكلات فيما يتعلق بتلوث الجو أو التخلص من النفايات مع محطات القوى المائية. ومصادر الطاقة كالنفط والفحم والغاز، مما يمكن استعماله لتوليد الكهرباء آخذة في النفاد، كما تشكل عبئاً على مصادر النقد الأجنبي، ويمكن للقوى المائية بسهولة أن تحل محلها، وعلاوة على ذلك، فيمكن أن تفي مشروعات القوى المائية باحتياجات الري في المناطق الواقعة بعد المحطة، إلى جانب الاحتياجات للقوى.



### مشكلات محطات القوى المائية:

طبقاً لتقديرات هيئة الكهرباء المركزية بالهند يصل المخزون السنوى من الطاقة الكهرومائية بالبلاد، عند معامل حمل قدره ٦٠ % إلى ٨٩٨٣٠ ميغاوات، إلا أنه تم بالكاد استغلال ٢٥% منها فقط حتى الآن. ولعل السبب يعود إلى ضخامة الاستثمارات الابتدائية وطول مدة تنفيذ المشروعات الكهرومائية بالنسبة لغيرها. والعيب الآخر لهذه المشروعات هو الاضطرار إلى نزوح السكان وتدمير البيئة والأراضى الزراعية الخصبة. ويبدو أنه لا مناص من مشكلة طول مدة التنفيذ، أما فيما يخص بمشاكل نزوح السكان وتدمير البيئة والأراضى الخصبة، فيجرى التركيز حالياً على عدم تشييد سدود ضخمة، بل إقامة مشروعات run-of-the-river (التوليد مع سريان الماء بالنهر دون تخزينه). وفى حين تفضل السدود عند سفوح التلال، بحيث يمكن الاستفادة منها فى رى الأراضى فيما بعد السد، تحبذ مشروعات توليد القوى من مياه النهر فى أثناء جريانه دون تخزين فى مناطق التلال العالية البعيدة عن السهول. ولا تتطلب هذه المشروعات مخزوناً مائياً ضخماً، بل تتولد الكهرباء من الماء المتاح بالنهر لدى توقيت معين. ولا حاجة إلى نزوح أى من السكان. من ناحية أخرى فمثل هذه المشروعات لا تضر بالغابات ولا البيئة، بيد أنها لا يمكنها زيادة توليد الكهرباء بكميات تفى باحتياجات ساعات الذروة، وهى ما توفره المشروعات الكهرومائية التى تعتمد على مخزون مائى، ومن ثم فقد يحبذ مزيج من هذين النوعين معاً.

### القدرة النووية:

أدى نقص النوعيات الجيدة من الفحم، ونقص النفط والغاز الطبيعى إلى ضرورة التعجيل بتطوير قدرات الهند النووية. وتمثل القوى النووية فى الوقت الراهن ٢٤ % من إجمالى الكهرباء المولدة بالبلاد. وقد دخلت محطات القوى

النووية الهند مع عام ١٩٦٩ بتوريد أول محطة قوى ذرية فى تارابور بتقنية أجنبية، إلا أن الهند أنجرت برنامجاً مشهوداً لمحطات القوى النووية بتشيد وتوريد محطة قوى " كالبكام " الذرية المحلية فى مدراس عام ١٩٨٣. ومنذ ذلك الحين ولدى الهند كل الإمكانيات اللازمة لإقامة محطات القوى النووية.

### البرنامج ذو الثلاث مراحل:

فى عام ١٩٤٥، صاغ الدكتور "هومى ج. بهابها" برنامجاً من ثلاث مراحل بهدف الوصول إلى الاعتماد الذاتى على النفس فى توليد القوى النووية باستخدام مصادر اليورانيوم والثوريوم المتوفرة بالهند:

### المرحلة الأولى:

استعمال اليورانيوم الطبيعى (يو ٢٣٨) كوقود فى مفاعل بالماء الثقيل تحت ضغط (PHWR) لتوليد الطاقة وإنتاج البلوتونيوم.

### المرحلة الثانية:

استعمال البلوتونيوم المنتج فى مفاعل - مولد سريع (FBR) Fast breeder reactor لإنتاج بلوتونيوم إضافى، واليورانيوم ٢٣٣ من الثوريوم باستعمال الطاقة.

### المرحلة الثالثة:

استعمال الثوريوم واليورانيوم ٢٣٣ فى دورة وقود متقدمة ومنظومة مفاعل (وهذه المرحلة رهن التطوير حالياً).

وقد بلغت المرحلة الأولى النطاق التجارى، حيث بدأ توليد القوى من الطاقة النووية بالهند فى ١٩٦٩ بتوريد أول محطة قوى ذرية فى (تارابورا). ويقدر إجمالى القدرة المركبة بمحطات القوى النووية العاملة فعلاً فى خمسة مواقع بخمس ولايات بالهند، بنحو ١٩٤٠ ميجاوات تقريباً وكما يوضحها الجدول التالى:

جدول ( ١ - ١ )

قائمة بالمفاعلات النووية (بالهند)

الموقع	عدد المفاعلات ونوعها	القدرة التقريبية بالميجاوات	سنة التوريد
في التشغيل:			
١ - تارابور (٢،١)	٢ مفاعل - مولد	$320 = 160 \times 2$	١٩٦٩
٢ - راوتبهاتا (٢،١)	٢ مفاعل بالماء الثقيل المضغوط	$300 = 200 + 100$	١٩٨١، ١٩٧٣
٣ - كالبكام (٢،١)	٢ مفاعل بالماء الثقيل المضغوط	$440 = 220 \times 2$	١٩٨٥، ١٩٨٣
٤ - نارورا (١)، نارورا (٢)	٢ مفاعل بالماء الثقيل المضغوط	$440 = 220 \times 2$	١٩٩١، ١٩٩٠
ككاربار (١)، ككاربار (٢)	٢ مفاعل بالماء الثقيل المضغوط	$440 = 220 \times 2$	١٩٩٥، ١٩٩٢
الإجمالي ١٩٤٠			
تحت الإنشاء:			
١ - ككاربار (٣)، ككاربار (٤)	٢ مفاعل بالماء الثقيل المضغوط	$440 = 220 \times 2$	
٢ - راوتبهاتا (٣)، راوتبهاتا (٤)	٢ مفاعل بالماء الثقيل المضغوط	$440 = 220 \times 2$	
٣ - كايجا (١)، كايجا (٢)	٢ مفاعل بالماء الثقيل المضغوط	$440 = 220 \times 2$	
٤ - تارابور (٣)، تارابور (٤)	٢ مفاعل بالماء الثقيل المضغوط	$1000 = 500 \times 2$	
مخطط إقامته:			
١ - كايجا (٣، ٤، ٥، ٦)	٤ مفاعل ماء ثقيل مضغوط	$880 = 220 \times 4$	
٢ - راوتبهاتا (٥، ٦، ٧، ٨)	٤ مفاعل ماء ثقيل مضغوط	$2000 = 500 \times 4$	
٣ - كودانكولام (١، ٢)	٢ مفاعل VVER <sup>(*)</sup>	$2000 = 1000 \times 2$	
المستهدف لعام ٢٠٢٠م: ٢٠٠٠٠ ميجاوات تقريبا			

(\*) مفاعل VVER: هو اختصار لعبارة Vapour Vacuum Extraction Reactor (المترجم)

ولقد كان تشغيل المفاعل المولد التجريبي في كالبكام عام ١٩٨٥، بقدرة حرارية ٤٠ ميجاوات، وقدرة كهربائية ١٣ ميجاوات مؤشراً على بدء المرحلة الثانية في برنامج الهند للقوى النووية.

وفيما يتعلق بالمرحلة الثالثة، فقد تم إحراز تقدم طيب، تمثل في تصنيع الوقود الحامل (يو ٢٣٣) واختباره في منظومة مفاعل صغير، وهناك تحت الإنشاء منظومة متقدمة لمفاعل يعمل بالماء الثقيل ويمكنه الاستفادة الملائمة من دورة وقود الثوريوم / يو - ٢٣٣. وتقوم إستراتيجية الهند على المدى البعيد، على الاعتماد على مفاعلات الثوريوم للأسباب الآتية:

أ - يساعد الثوريوم المحول إلى يو - ٢٣٣ على الحفاظ على استمرار الدورة دون تدخلات ذات بال من مواد انشطارية خارجية.

ب - إمكانات الطاقة للثوريوم في المفاعلات الحرارية تفوق تلك الخاصة باليورانيوم الطبيعي.

ج - لدى الهند من الثوريوم عالي الجودة خمسة أضعاف ما لديها من اليورانيوم تقريباً (هناك وفرة في الثوريوم تتيحها المصادر الطبيعية).

د - إمكانات الثوريوم تتجاوز متطلبات المفاعلات السريعة.

تعيين مواد الطاقة النووية:

تتميز الهند بالثراء في بعض المواد الذرية والنووية المعدنية بعينها، حيث يجري الحصول على اليورانيوم من مناجم (جادوجودا) في مقاطعة سينجبهوم ببيهار، وكذلك من مواقع في راجستهان، ورمال المونازايت(\*) الوفيرة على ساحل كيرالا هي مصدر رئيسي للثوريوم واليورانيوم.

كذلك يتواجد الألمينايت والزركونيوم المركزان بالرمال الساحلية بمالابار وكورومانдал، ويتواجد الجرافيت في مادهيابراديش وتاميل نادو.

---

(\*) المونازايت (Monazite) مادة خام تحوي عناصر الثوريوم والسيريوم واللنثانيوم (المترجم)

## الطاقات غير التقليدية:

لدى الهند إمكانات عريضة من مصادر الطاقة المتجددة، وقد طور عدد من التقنيات فى سبيل استغلالها، فقد أقيمت عدة قواعد صناعية بالبلاد لتطبيق مختلف تقنيات الطاقة المتجددة، كالطاقة الشمسية الحرارية والطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح والمحطات المائية الصغيرة ومصادر الطاقة الحيوية وغيرها، وتبلغ القدرة المركبة الإجمالية لهذه التقنيات ٩٠٠ ميجاوات.

## الخطّة والسياسة:

بمقدور مصادر الطاقة غير التقليدية أن تحل مشكلتين متلازمتين من مشاكل التزويد بالطاقة: فهى من جهة تحقق اللامركزية فى الإمداد بها، ومن جهة أخرى تسهم فى المحافظة على نظافة البيئة، وتشجع الحكومة تنمية مصادر الطاقة الجديدة والمتجددة لمجابهة الطلب المتزايد عليها، والوقوف كإضافة إلى جانب مصادر الطاقة التقليدية الآيلة للنفاذ، وللوفاء باحتياجات المناطق الريفية.

وقد تأسست إدارة "مصادر الطاقة غير التقليدية DNES فى عام ١٩٨٢"، وتطورت فيما بعد بحيث أصبحت وزارة مستقلة ترعى شئون تطوير مصادر الطاقة الجديدة وغير التقليدية، وتتضمن نشاطاتها الرئيسية وضع برامج لتطوير الاستفادة من الطاقة الشمسية وطاقات الرياح والمحيطات، والطاقة من الهيدروجين والمصادر الحيوية والكيميائية والطاقة من المخلفات والغاز الحيوى ومواقد "التشولها" Chulha<sup>(\*)</sup>، وإعادة تدوير النفايات والطاقة المغناطيسية - الهيدروديناميكية وغيرها، وتولى برامج ومخططات الاستفادة من مصادر الطاقة

---

(\*) موقد التشولها (Chulha): موقد مصمم بحيث يحد من الأضرار الصحية نتيجة الطهى فى الأماكن الضيقة المغلقة (المترجم)



الجديدة والمتجددة عناية خاصة لاستثمار التعاون مع منظمات المجتمعات المحلية وتلبية احتياجاتهم ذات الحجم المحدود من القدرة للأغراض من قبيل الطهي والتزويد بالمياه لأغراض الري المحدودة والشرب والاستعمالات المنزلية إلى جانب إضاءة الطرقات، وقد أثبتت تلك البرامج فاعليتها بصفة خاصة في توفير نوع من الرفاهية للقطاعات المحرومة من المجتمع.

### الطاقة الشمسية:

الطاقة الشمسية هي الآتية من الشمس في صورة إشعاع، فالشمس مصدر هائل للطاقة، ومما يعتقد أن ٠,١% فحسب من ٧٥٠٠٠ تريليون كيلوات ساعة من طاقة الشمس التي تصل للأرض كافية للوفاء باحتياجات كوكب الأرض، وبالوسع استغلال طاقة الشمس بثلاثة سبل:

أ - تحويلها إلى طاقة حرارية.

ب- تحويلها إلى كهرباء.

ج- التمثيل الضوئي.

### الطاقة الحرارية:

يمكن الحصول على الطاقة الحرارية باستخدام مجمع شمسي، ولقد دخل عدد كبير من تطبيقات استغلال طاقة الشمس الحرارية المستوى التجاري، وخصوصًا تلك التي تلزمها طاقة حرارية محدودة. ويتضمن ذلك أجهزة الطهي، ومنظومات تسخين الماء شمسياً، وتجفيف المحاصيل الزراعية، والتبريد، وضخ المياه، والمعالجة الموسمية للخشب، وتحلية المياه المالحة، ويتواصل العمل حالياً لتطوير مجمعات شمسية ذات جدوى اقتصادية في حالات

تطبيقات درجات الحرارة العالية. والمنظومات الحرارية الشمسية هي اليوم إحدى الوسائل الإضافية عند مختلف درجات الحرارة بين ٦٠، ٣٨٠ م للأغراض المنزلية والصناعية المتنوعة، بما في ذلك عمليات التسخين الصناعية وتوليد القوى.

ولدى منظومات تسخين الماء بالشمس إمكانات عريضة لتوفير الكهرباء المستهلكة في القطاعات المنزلية والتجارية، ولتوفير النفط المستهلك في القطاع الصناعي من أجل التزويد بالماء الساخن، وقد دراسة الحكومة في الوقت الراهن اقتراح بإقامة مشروع للقوى الحرارية الشمسية بقدرة ٣٥ ميجاوات في قرية مايتهاانيا بجودهبار في راجستهان.

ومركز الطاقة الشمسية التابع لوزارة "مصادر الطاقة الجديدة والمتجددة" هو الجهة المحورية في نشاط البحوث والتطوير، وتضم نشاطات المركز بحوثاً في التسخين الشمسي، وتصميم المنظومات وتنفيذها، وتوليد القوى الحرارية من الطاقة الشمسية والمعمار الشمسي(\*) وتقنية الدفيئة (الاحتباس الحراري).

### التأثير الشمسي الكهروضوئي:

في المنظومات الشمسية الكهروضوئية تولد الكهرباء رأساً من الطاقة الشمسية، حيث تعمل على أساس الظاهرة الكهروضوئية، فعندما يسقط الضوء على مواد معينة مثل السليكون، تستثار الإلكترونات وتفر من المعدن، وتتجمع هذه الإلكترونات لدى معدن آخر - عبر الأسلاك - في شكل تيار منتظم، وفيض الإلكترونات المتولدة بهذه الكيفية يكون تياراً كهربياً، والوحدة الأساسية في

---

(\*) يقصد به مراعاة المتغيرات الشمسية عند تصميم المنزل معمارياً بحيث تتوفر الراحة داخله طوال النهار وتستغل الطاقة الشمسية في التدفئة من غير ما حاجة لأجهزة ميكانيكية (المترجم)

المنظومة الشمسية الكهروضوئية هي الخلية الشمسية، وهي عبارة عن مجموعة رقائق من معدن باعث للإلكترونات.

وهيئة مصادر الطاقة غير التقليدية DNES هي المنوط بها تطوير الأجهزة الشمسية الكهروضوئية وإنتاجها وتطبيقات استخدامها، ومنذ ١٩٧٨، عندما انطلق أول برنامج للبحوث والتطوير في مجال المنظومات الكهروضوئية من خلال شركة الإلكترونيات المركزية المحدودة (بجازياباد)، تم إحراز تقدم ملموس في هذا المجال، وخلال الفترة من ١٩٨٥ - ٩٠، تم إنتاج منظومات الكهرباء الشمسية على نطاق تجاري في الشركة المركزية المحدودة للإلكترونيات في جازياباد، وفي شركة راجستهان المحدودة للأدوات الإلكترونية في جايبور، كما بدأت بالفعل عمليات كهربة قرى بعيدة، حيث كانت قرية "ساليجيالي" في أندرا براديش أول قرية في البلاد جرت كهربتها باستخدام المنظومات الكهروضوئية الشمسية، ولقد تم بالفعل توريد أول مشروعين للقوى من المنظومات الشمسية الكهروضوئية، ودمجهما جزئياً بالشبكة بقدرة ١٠٠ كيلووات لكل منهما، في (كاليانبور) بمقاطعة (اليجاره)، و(سارايسادي) في مقاطعة (ماو) بأوتار براديش.

وتستعمل المنظومات الشمسية الكهروضوئية في الهند حالياً في تزويد المناطق الريفية والقاصية التي لم تدخلها شبكة الكهرباء في الاستخدامات المتعددة التي تلزمها قدرات محدودة مثل الإنارة، وضخ المياه وتشغيل إشارات السكك الحديدية وفي منظومات شبكات الاتصال الريفية، وفي تنقية المياه لأغراض الشرب والري ومحطات إعادة بث الموجات الميكرونية، وإمداد المعدات الإلكترونية بالطاقة بالمنصات المنصوبة على مبعدة من الشاطئ، وخطوط أنابيب النفط والغاز وفي خطوط نقل الإرسال التليفزيوني، ولهذه الطريقة في استغلال الطاقة الشمسية جاذبيتها باعتبار ظروف الإشعاع الشمسي المواتية، والاحتياجات الضخمة للكهرباء في التطبيقات اللامركزية، وتتميز المنظومات الكهروضوئية

بسهولة إقامتها وصيانتها، وخلوها من الضوضاء والتلوث، وطول عمرها، مما يركى استعمالها فى المناطق النائية أو المنعزلة، والغابات والمناطق التى بنا تلال وعرة وفى الصحارى.

والأمر الرئيسى الوحيد الذى يحد من انتشار المنظومات الشمسية - الكهروضوئية، هو ارتفاع الاستثمارات الابتدائية، وأهم المكونات المكلفة هى رقائق السليكون والتى يتم - جزئيا - استيرادها، ومن حسن الحظ أن شركة ميتكم المحدودة للسليكون (ضمن مجموعة تشيمبلست) بالتعاون مع معيد (بانجالور)، قد نجحت فى إنتاج السليكون المتبلر محليا، وفى تطوير عملية إنتاج غاز السيلين  $\text{Silane gas}^{(*)}$ ، وهو مادة جديدة للسليكون غير المتبلر، كما بدأت شركة سوريوفونيكس المحدودة بحيدرأباد فى إنتاج السليكون غير المتبلر، ولقد جرى بالفعل توريد مصنع - على مقياس تجريبى - بنظام تحكم آلى شامل لإنتاج نماذج من المنظومات الكهروضوئية الشمسية التى تعمل بالسليكون غير المتبلر المحتوى على طبقة سفلية من الزجاج، فى جورجاون سنة ١٩٩٢.

### التمثيل الضوئى:

التمثيل الضوئى هو ظاهرة التحول الكيميائى لثنائى أكسيد الكربون والماء إلى كربوهيدرات فى وجود ضوء الشمس ومادة الكلوروفيل (الخضور) فى النبات، وهو أحد أعلى الوسائل كفاءة فى الطبيعة لتحويل طاقة الشمس إلى صورة صالحة للتخزين، لقد ثبت أن نسبة تصل إلى ٣٠% من الضوء الممتص فى الطحالب ورتب النباتات الأعلى - وذلك فى ظل ظروف مواتية وعبر فترات زمنية قصيرة ومع شدة إضاءة منخفضة نسبيا - تتحول إلى طاقة كيميائية.

---

(\*) غاز السيلين  $\text{Silane gas}$ : هو غاز عديم اللون قابل للاحتراق مكون من السليكون والهيدروجين رمزه الكيميائى  $\text{Si H}_4$  (المترجم)

## الطاقة الحيوية:

ويقصد بها الطاقة المنتجة في الكيانات الحيوية، وتنتج الطاقة الحيوية إما مباشرة باستعمال المصادر الحيوية، أو بتحويل الطاقة إلى صورة وقود غازي أو سائل (ويشمل ذلك الغاز الحيوي Biogas).

## مصادر الطاقة الحيوية:

تحتل مصادر الطاقة الحيوية مكانا بارزا كمصدر للطاقة بمناطق الهند الريفية، ويعرف مصدر الطاقة الحيوي Biomass بأنه مادة حية أو مخلفات منها، وهي مصدر متجدد للطاقة، والمثل الدارج للمصادر الحيوية: الخشب والأعشاب والحشائش والحبوب وثقل (أي مصاصة) سكر القصب، وما إلى ذلك، ويمكن تصنيف مصادر الطاقة الحيوية الرئيسية إلى مجموعتين:

(١) نفايات مادية تشمل تلك المواد المتخلفة عن الزراعة، والحراثة(\*) والنفايات من المرافق المحلية.

(٢) محاصيل تزرع بغرض إنتاج الطاقة وتشمل زراعات غابية قصيرة الدورة.

وفي إطار برنامج استغلال المصادر الحيوية، بدأت عملية استزراع نوعيات من النباتات والأشجار سريعة النمو ذات دورة قصيرة الأمد وذات قيم حرارية مرتفعة للوفاء بالاحتياجات من الوقود والأعلاف والقوى المحركة، وتسمى هذه العملية "بالاستزراع بغرض الطاقة" Energy Plantation.

---

(\*) الحراثة Forestry: هي علم وفن زراعة ورعاية وتطوير الغابات (المترجم)



وللاستزراع فى المناطق الماحلة - إلى جانب ما يوفره من طاقة - فائدة تحسين خصوبة التربة وتقليص تآكلها.

ولتوليد القوى المحركة من المصادر الحيوية جرى تطوير منظومات تحويلها إلى غاز وآلات تقلبيها محلياً.

وتحول هذه الأجهزة نفايات الكيانات الحيوية والبقايا الزراعية إلى طاقة من خلال تحويلها لغاز أو إحراقها. ومصادر الطاقة الحيوية تستعمل بالمثل فى إنتاج الوقود السائل لتسهيل نقله كالأيثانول والميثانول، والوقود الصلب عن طريق تحويل النفايات الزراعية إلى مكورات Pellets وقوالبات Briquettes. والزيوت الخضرية، ذات القيمة الحرارية العالية وخواص الاشتعال التى تقارب خواص زيت الديزل يمكنها أن تحل كبديل، أو إضافة مكملة له، على أن للزيوت الخضرية لزوجة مرتفعة ومخلفات كربونية تؤدي إلى صعوبات فى ضخها وتبخيرها فى الآلات، وإلى انبعاث أدخنة كثيفة فى جهة العادم، وللتغلب على هذه العقبات اتبع معهد بحوث مدراس IIT مدخلين مختلفين:

أ - تحويل آلة الديزل بحيث تصبح أكثر أديباتية(\*).

ب- أسترة(\*\*) الزيوت الخضرية بالميثانول أو الإيثانول.

ويعكف معهد دلهى للبحوث على الاستغلال الأمثل للغاز المنتج فى آلات الاحتراق.

---

(\*) العملية الأديباتية adiabatic فى الديناميكا الحرارية هى العملية التى لا يصحبها انتقال للحرارة (المترجم)

(\*\*) الأسترة esterification هو تحويل المادة إلى مركبات عضوية مماثلة للأملاح غير العضوية والمتشكلة من حمض عضوى وكحول (المترجم)

ولقد أنشئت سبعة مراكز لبحوث الطاقة الحيوية تحت الظروف المناخية والزراعية المتباينة بالبلاد لدعم التطوير في هذا المجال.

ولقد اتخذت الهند الخطوات الآتية لاستخلاص الطاقة من المصادر الحيوية:

- إقامة محطة حرارية بقدرة ١٠ ميجاوات تستغل قش الأرز - وهي الأولى من نوعها - وتم توريدها بمعرفة هيئة BHEL في جهالكهارى بالبنجاب.

- بدأ في بومباى التشغيل التجريبي لأول مصنع - على المقياس الكبير - لإنتاج مكورات الوقود من نفايات المرافق المحلية.

- أقيمت في بورت بلير محطة تحويل المخلفات لغاز بقدرة ١٠٠ كيلو وات، ويجرى حالياً تقييم ميدانى لمشروع لمنظومة بقدرة ١٥ كيلوات باستغلال الماء وسكر القصب.

### الغاز الحيوى:

الغاز الحيوى مصدر مستديم للطاقة، بفضل الحصول على المخلفات العضوية الطبيعية التى تنتشر على نطاق واسع، وبفضل سهولة تشييد وحدات إنتاجه وتشغيلها وصيانتها للفوائد المتعددة التى تعود منها على الدولة والمستهلكين على حد سواء.

والغاز الحيوى هو مزيج غازى (بتركيبات متفاوتة) وإن كان يتكون بصفة عامة من الميثان بنسبة ٦٠% (وهو وقود ذو قيمة حرارية عالية)، ٤٠% من ثانى أكسيد الكربون (وهو غاز خامل) إلى جانب نسب طفيفة من غازات أخرى كالنيتروجين وكبريتيد الهيدروجين، ويتكون من التخمر اللاهوائى (وهو عملية حيوية) للمخلفات العضوية الطبيعية.

وإما أن تكون هذه المخلفات العضوية:

أ - روث الأبقار وإفرازات الحيوانات الأخرى.

ب- أو إفرازات بشرية إخراجية (غائط).

ج - نفايات زراعية مثل القش والنباتات وأوراقها والطحالب ومصاصات  
قصب السكر والقشور الخارجية للثمار والبذور، والحشائش المائية...  
إلخ.

د - النفايات الصناعية المحتوية على مواد سايولوجية مثل الأوحال  
المترسبة بأحواض تقطير المياه، ونفايات مدابغ الجلود، والصناعات  
الغذائية ومصانع الورق وما إلى ذلك.

ويشيع إنتاج الغاز الحيوى فى المعتاد من روث الماشية فى مصانع الغاز  
الحيوى المعروفة باسم *gobar gas plant*<sup>(\*)</sup> من خلال عملية تحال المواد العضوية  
بفعل البكتريا (التخمير اللاهوائى).

ومع انبعاث الغاز الحيوى لا تقل قيمة الروث لاستعماله كسماد، بل إن  
المادة الطينية الخارجة من مصنع الغاز الحيوى هى بمثابة سماد تم إثراؤه، لمحتواه  
العالى من الأكسجين والفسفور والبوتاسيوم، وطبقا لذلك تساعد مثل هذه المصانع  
على توفير كل من الوقود والسماد العضوى من نفس المادة، وهى روث الماشية.

ويمثل الغاز الحيوى وقوداً نظيفاً ورخيصاً يصلح لمتطلبات الطهى، كما  
يمكن استعماله لأغراض الإنارة، وإدارة المحركات الصغيرة بالقدرة اللازمة  
للصناعات القروية الصغيرة، وهناك العديد من المميزات التى تتوفر للأسر الريفية  
إذا ما اتبعت تقنية الغاز الحيوى، فهى تكفى النساء والأطفال مئونة جمع أخشاب

---

(\*) Gobar: كلمة هندية تعنى روث البقر (المترجم)

الوقود، وحمل حزمه الثقيلة على الرعوس، والتخلص من الأدخنة المتصاعدة التي هي جزء أصيل في موافد التشولها Chulhas التقليدية، تلك التي تؤذى الأعين وتجلب أمراض الرئة، علاوة على توفير الكثير من الوقت المنقضى في الطهي وتنظيف أوعيته وأدواته والاستغناء عن قطع الأشجار من أجل توفير الوقود، وإذا ما ألحقت مراحيض (مباول) بهذه المصانع فإنها تساعد على الصرف الصحي من القرى أيضاً.

وما يجعل مثل هذه الوحدة ذات جدوى اقتصادية، هو أن التدفق النقدي المستفاد يتمثل في توفير خشب الوقود، وإنتاج السماد العضوي الغني بمحتواه المرتفع من الأكسجين والفسفور والبوتاسيوم واستغلاله في الزراعة.

لقد طور العلماء كذلك مصانع الغاز الحيوي، بحيث يتيسر تشغيلها بمواد متنوعة مثل الغائط البشري وزنابق الماء والمخلفات الزراعية، وبقايا الخروع بعد نزع الزيت منه ونشارة خشب الصفصاف وبقايا المواد الغذائية.

وزارة "مصادر الطاقة غير التقليدية" ماضية في تنفيذ المشروع القومي لتطوير استغلال الغاز الحيوي الذي بدأ في الفترة من ١٩٨١ - ٩٢، كخطة مركزية ترعاها الدولة.

### **الطاقة من المحيطات:**

يمكن استغلال المحيطات أو البحار في الحصول على الطاقة بثمانية أساليب:

#### **تحويل طاقة المحيطات لحرارة:**

لدى الهند رصيد هائل من إمكانية تحويل طاقة المحيطات حرارياً، يصل مقدارها لزهاء ٥٠٠٠٠ ميجاوات، ويقع واحد من أفضل المواقع في العالم لتحويل

طاقة المحيطات حراريًا خارج أراضي الهند الرئيسية على مقربة من جزر لاكشادويب وأندامان ونيكوبار، ولقد أقيمت خلية لطاقة المحيطات عند معهد البحوث بمدراس لمواكبة التطورات العالمية في ذلك المضمار، وتطور شركة أمريكية، هي Sea Solar Power Inc، الاستفادة من التحويل الحراري لطاقة المحيطات، وأول محطة في العالم مقترح إقامتها على مبعده من ساحل تاميل نادو، بقوة محرك مقدارها ١٠٠ ميجاوات.

ويفيد تحويل طاقة المحيطات حراريًا من فرق درجات الحرارة ما بين سطح البحر، وعلى عمق ١٠٠٠ م منه أو تزيد، في استخراج الطاقة، وتستعمل القدرة الناتجة في إدارة توربينات توليد الكهرباء، وفي بلاد المناطق الاستوائية - كالهند - يصل منحدر درجات الحرارة إلى حوالي ٢٥ م<sup>٢</sup> والعقبة الرئيسية في تحويل طاقة المحيط الحرارية هو عامل التكلفة، وصعوبة التشغيل وانخفاض الكفاءة.

### طاقة الأمواج:

تسخر طاقة الأمواج، والتي تتمثل في حركتها الدائبة ارتفاعًا وانخفاضًا، في تشغيل توربينات مائية أو - وهو الأفضل - توربينات هوائية في توليد الكهرباء، وإمكانيات طاقة الأمواج على امتداد سواحل الهند التي يصل طولها إلى ٦٠٠٠ كيلو متر تقدر بنحو ٤٠٠٠٠ ميجاوات، وتمثل أحزمة الرياح التجارية في بحر العرب وخليج البنغال أماكن نموذجية لاقتناص طاقة الأمواج.

والقدرة المولدة من الأمواج متجددة ولا تسبب تلوثًا، بيد أنها باهظة التكاليف (روبية هندية لكل وحدة<sup>(\*)</sup>).

وتقوم أول محطة قوى هندية لاستغلال طاقة الأمواج بطاقة ١٥٠ كيلووات (كحد أقصى)، على فكرة عمود الماء المتذبذب Oscillating water column،

---

(\*) تعادل الروبية الهندية حوالي ٧،١ سنت أمريكي وقت صدور الكتاب (المترجم)



وقد تم توريدها في فجينجام بواسطة معهد البحوث بمدراس، وقد أعلنت إدارة "تطوير طاقة المحيطات" أن محطة قوى فجينجام هي ثروة قومية لدراسات طاقة الأمواج وتطبيقات استخدامها، هذا وقد طورت هيئة سويدية هي (Sea Power AB)، تقنية تسخير طاقة الأمواج بموجب مفهوم (قوى الأمواج الطافية Floating wave power<sup>(\*)</sup>)، وتسخير طاقة الأمواج وفقا لهذا المبدأ يتم بحثه في الهند، حيث يجري إنشاء محطة قوى بقدرة ١ ميغاوات حاليا في جزر أندامان ونيكوبار.

### طاقات موجات المد والجزر:

إن تيارات المد والجزر المنتظمة والناجمة عن الشد الجذوى لكل من الشمس والقمر لها فائدتها في توليد الكهرباء، وبوجه خاص حيث يبلغ مدى الموجات (وهو الفرق ما بين المد العالى والجزر المنخفض) قدراً كبيراً، وإذا ما أتيح مستودع مياه مناسب، طبيعياً كان أو صناعياً، فبالمقدور توليد القدرة بإمرار موجات المد والجزر عبر توربينات، وإمكانات طاقة موجات المد والجزر بالهند تقدر بزهاء ٨٠٠٠ إلى ٩٠٠٠ ميغاوات، والمواقع الصالحة المتعارف عليها هي خليج كومباى (٧٠٠ ميغاوات)، وخليج كوتش (١٠٠٠ ميغاوات)، وسونديان (١٠٠ ميغاوات)، ومن المقترح تشييد أول محطة قوى بموجات المد والجزر بآسيا بقدرة ٩٠٠ ميغاوات في (كاندلا) بخليج كوتش.

### طاقة التيارات المائية:

بالوسع - نظرياً - استعمال تيارات المحيط المتحركة فى توليد الطاقة بالسماح للمياه بالمرور عبر سلسلة من التوربينات المركبة أسفل الماء، إلا أن كثافة الطاقة التى يتيسر استغلالها ضئيلة، كما أن تثبيت التوربينات فى مواضعها هو الذى يمثل المشكلة الأكبر.

---

(\*) يعنى محطة قوى لتحويل طاقة الأمواج لكهرباء (المترجم)

## طاقة رياح المحيطات:

الرياح التي تهب على المناطق الساحلية أقوى وأكثر انتظامًا - نسبيًا - من رياح المناطق البرية، ويمكن تسخيرها كمصدر للطاقة، وتقوم كثير من البلدان بتوليد الطاقة من هذا المصدر، وتتلخص المشاكل التي ترتبط بمناطق الرياح التجارية في التلج icing، وهبوب الأعاصير<sup>(\*)</sup>.

## الطاقة المستمدة من منحدر درجة الملوحة Salinity gradient .

إذا وضع غشاء شبه منفذ ما بين وسطين مائيين مختلفين في درجة تركيز الملوحة، فسيبدأ الماء ذو الملوحة الأقل في التسرب خلال الغشاء صوب الجهة ذات الملوحة الأعلى إلى أن تتعادل درجة التركيز في الجانبين.

ويطلق على هذه الظاهرة (التناضح) أو (التنافذ الغشائي) Osmosis، ويمكن توليد تيار كهربى من خلال هذه الحركة الأزموزية، وهناك نموذج نصف صناعى فى السويد يجرى تشييده لتوليد قدرة مقدارها ٢٣٠٠ ميغاوات اعتمادًا على الطاقة المستمرة من اختلاف درجة الملوحة.

## طاقة الأرض الحرارية بالمحيطات:

تستعمل هذه الطريقة - من الناحية النظرية - تدرج درجات الحرارة (كما فى حالة تحويل طاقة المحيطات حراريًا)، ولكن بأسلوب معاكس، حيث تكون درجة حرارة القشرة الأرضية منخفضة عن درجة الحرارة العالية فى باطنها، بيد أن هذه الطريقة لم يتم تطبيقها بعد على نحو عملى.

---

(\*) يطلق لفظ الإعصار hurricane على الرياح التي تتجاوز سرعتها ١١٩ كيلو مترًا فى الساعة (المترجم)

## طاقة التحول الحيوى:

يمكن بالمثل تحويل الأعشاب البحرية إلى وقود وإلى مصادر طاقة أخرى كالميثان، والأغذية، والأسمدة.

## طاقة الرياح:

تبرز الرياح كواحدة من أهم مصادر الطاقة البديلة ذات الإمكانيات الضخمة والقادرة على المساعدة - إلى حد بعيد - على عبور الفجوة بين الاحتياجات من الطاقة والمعرض منها، فالرياح طاقة حركية عائدة إلى تحريك كتل هوائية ضخمة نتيجة للتفاوت في معدلات تسخين الشمس لطبقات الجو، وباستطاعتنا استغلال تلك الطاقة لبذل شغل ميكانيكى وكهربى، ويمكن استعمال توربينات الرياح فى توليد الكهرباء، ورفع المياه من الآبار، وفى الضخ المباشر للمياه.

وتشير تقديرات إمكانيات طاقة الرياح بالهند إلى رقم ٢٠٠٠٠ ميغاوات، ولقد تم حتى عام ١٩٩٥ - ٩٦ إقامة قدرات يبلغ إجماليتها ٧٣٢ ميغاوات، والأماكن المحبذة لتشييد محطات قوى بالرياح هى المناطق الساحلية فى تاميل نادو، وجوجارات، وأندرا براديش وماهاراشترا. ولقد تطور توليد القدرة من الرياح بالهند سواء فى النماذج المفردة القائمة بذاتها **Stand alone modes** مع وجود محركات ديزل احتياطية ومخزون مسبق بالضخ لضمان استمرارية الإمداد فى حالة ضعف الرياح، أو فى مزارع الرياح التى تحوى صفوفاً من التوربينات التى تمتد الشبكة بعصب احتياجاتها، ويقع أول مشروع لمزارع الرياح الآسيوية فى "ماندفي" بمقاطعة كوتش بولاية جوجارات، وأكبر تجمع لمزارع الرياح المجمعة بطاقة ١٥٠ ميغاوات يقع فى موبانداى بتاميل نادو.

## طاقة الأرض الحرارية:

طاقة جوف الأرض الحرارية هي تلك الطاقة الناتجة من العمليات الطبيعية التي تحدث بباطن الأرض، والمصدر الرئيسى لهذه الطاقة (والتي تكون فى صورة حرارة) هو الصخور والصحارة الموجودة تحت سطح الأرض، وتسخر طاقة الأرض الحرارية لأغراض التسخين وتوليد القوى من البخار الطبيعى أو الماء الساخن أو الصخور الجافة بالقشرة الأرضية، ويضخ الماء عبر بئر حقن إلى أسفل حيث يمر خلال ثغرات بين الصخور الحارة، ومن ثم يصعد الماء إلى السطح من خلال بئر استعادة Recovery well، وقد يحول هذا الماء إلى بخار فى مبادل حرارى، كما قد يمرر البخار الجاف خلال توربينات لتوليد الكهرباء، ويتيح نحو ١٠% من مساحة سطح الأرض الوصول إلى مصادر الحرارة بجوفها، وأكثر المصادر كفاءة هي البراكين والينابيع الحارة، غير أن هناك مناطق أخرى بالمثل يمكن استخلاص الحرارة منها تحت ظروف يتم التحكم فيها.

وهناك بالهند ٣٤٠ موقعًا للينابيع الحارة ذات درجة حرارة متوسطة بين ٨٠، ١٠٠ م° تم التعرف عليها كمصدر متاح للطاقة الحرارية الأرضية، ويجرى العمل على قدم وساق فى نواح عديدة من الهند لمسح حرارى شامل لباطن الأرض لتقييم إمكانية استغلال طاقة الأرض الحرارية فى التسخين المباشر وفى توليد القوى المحركة، ولقد تم بالفعل توريد محطة توليد نصف صناعية قدرتها ٥ كيلووات بما نيكاران بمقاطعة كوللو - ولاية هيماتشال براديش، كما تم تقييم دراسة محطة قوى لطاقة الأرض الحرارية قدرتها ٤ - ٥ ميجاوات فى وادى بوجابلاداكه فى جامو وكشمير.

وقد تم التأكد من إمكانية استخدام طاقة الأرض الحرارية في أغراض تدفئة المنازل وإحداث احتباس حرارى (دفئة). وقيد التنفيذ في مختبرات البحوث الإقليمية بجامو، مشروع لزراعة فطر عيش الغراب، وإنشاء مزرعة دواجن باستخدام موائع تستغل طاقة الأرض الحرارية، وستقام وحدة الاحتباس الحرارى اللازمة للمشروع بوادى باجو على أساس الاستفادة من البئر التى سبق حفرها لاستعمال طاقة الأرض الحرارية.

### **القوى المغناطيسية الهيدروديناميكية:**

يقوم توليد القدرة المحركة من القوى المغناطيسية الهيدروديناميكية على أساس تحويل الطاقة الحرارية رأسًا إلى كهرباء، مقارنة بمحطات القوى التقليدية التى تتحول فيها الطاقة الحرارية أولاً إلى طاقة ميكانيكية تحول بدورها إلى طاقة كهربية، ويتضمن توليد القوى المحركة من الطاقة الحرارية باستخدام القوى المغناطيسية الهيدروديناميكية، تمدد غاز شديد السخونة (٢٨٠٠ ° كلفن) وموصل كهربياً فى مواجهة قوة مجال مغناطيسى قوى معاوقة لإنتاج القدرة الكهربائية مباشرة، ومن ثم ففى المغناطيسية الهيدروديناميكية يندمج التوربين والمولد الكهربائى معاً فى وحدة واحدة لا تحتوى على أية أجزاء متحركة.

ولقد دعمت هيئة مصادر الطاقة غير التقليدية DNES مشروعاً بحثياً للقوى المغناطيسية الهيدروديناميكية على أساس الفحم بالهند، يهدف إلى إقامة قاعدة ملائمة لأعمال البحث والتطوير لتوليد القدرة عن هذا الطريق بتشيد محطة حرارية بقدرة ٥ ميجاوات، وتمضى البحوث قدماً لتصميم محطة أكبر للقدرة المغناطيسية الهيدروديناميكية لتوليد قدرة أنظف وأزهد تكلفة، وتعمل بكفاءة أعلى من محطات الفحم والمحطات النووية القائمة، ومن أجل إنجاز هذا الهدف يتم

تجميع البيانات من محطة قوى مغناطيسية هيدروديناميكية على مقياس صغير  
مقامة في "تيروشير ابالي" بتاميل نادو.

### الطاقة من الحيوان (الحيوانات كمصدر للطاقة):

تسهم طاقة الحيوان (drought animal power) بحوالي ٥٠% من إجمالي  
الطاقة المولدة بالبلاد، وتستعمل أساساً في أغراض الزراعة والنقل، وقد وضعت  
هيئة مصادر الطاقة غير التقليدية برنامجاً قومياً في هذا المجال في مارس من عام  
١٩٩٤، وفي إطار هذا البرنامج يجري تطوير المعدات والأجهزة ومركبات النقل  
التي يجرها الحيوان، كما تنفذ برامج لتحسين استغلال الطاقة البشرية في النقل  
بالركشا(\*) والدراجات وعربات اليد، بالإضافة إلى تحسين وترقية تصميم المعدات  
التي تدار بالقوى العضلية للعمال المعدمين والحرفيين المهرة.

### الطاقة من المخلفات الصناعية ونفايات المناطق الحضرية:

تطلق في البيئة بالهند كميات ضخمة من مخلفات الصناعة ونفايات المرافق  
العامة والمناطق الحضرية، دونما معالجة أو بعد معالجة محدودة، مما يقضى إلى  
تلوث البيئة، وتتحلل النفايات الملقاة في البيئة تحلاً عضوياً، مطلقة غاز الميثان في  
الجو، وبالإمكان استغلال هذه المخلفات كمصدر هائل للطاقة، ومن ثم المعاونة في  
تقليل انبعاث الغازات المسببة للاحتباس الحرارى وتقليص التلوث البيئى للحد  
الأدنى، بهدف الوصول إلى أقصى فائدة بيئية بالاستغلال القويم للمخلفات المتنوعة  
التي تتسبب حتى الآن في مشاكل التلوث، وقد انطلق برنامج قومى منذ

---

(\*) الركشا rickshaw عربة ذات عجلتين يدفعها رجل أو اثنان ينتشر استخدامها بالهند (المترجم)

يونيو ١٩٩٥ للمعالجة السليمة للمخلفات الصناعية والحضرية واستعادة الطاقة من هذه المصادر، وأقيم في دلهي مصنع لحرق مخلفات المناطق الحضرية الصلبة وتحويل الحرارة إلى كهرباء بطاقة ٣٠٠ طن من نفايات المرافق الصلبة يوميًا، وهناك مشروع قائم على عملية التحلل بالحرارة Pyrolysis لاستخلاص الوقود السائل من النفايات الصلبة مقترح إقامته في بومباي، وقيد التنفيذ عدة مشروعات ستولد فيها القوة المحركة من مصاصة القصب بمصانعه بالبلاد.

وتسعى هيئة مصادر الطاقة غير التقليدية لتطوير بدائل لمحركات الديزل والمحاليل الكحولية من أجل تقليل الاستهلاك منها نظرا لمحدودية المقادير الاحتياطية منها، وبالتالي تحجيم التدفق من العملات الأجنبية الصعبة إلى الخارج، وتتلخص هذه البدائل في:

### الغاز الطبيعي المضغوط:

للافادة من الغاز الطبيعي المضغوط كوقود للمركبات، فإنه يضغط إلى ١٦٠ - ٢٠٠ ضعف الضغط الجوي ويخزن في أسطوانات يمكن وضعها فوق سطح المركبة، وفي المركبات التي تستعمل البترول حيث يتم الإشعال بالشرارة Spark ignition يركب جهاز للتبديل إلى نظام الغاز، ويسمح هذا المبدل للغاز بالتمدد بواسطة صمام تقليل ضغط يخفضه إلى ما دون الضغط الجوي ثم يغذيه إلى آلة الاحتراق من خلال صمام تحكم يؤدي بالغاز إلى غرفة إحراق تعمل بدواسة سريعة، ويشعل خليط الغاز الطبيعي المضغوط والهواء في السيارات عن طريق شموع الاحتراق Spark plugs، أما في آلات الديزل فيحدث الإشعال عن طريق حقن جرعات ضئيلة من الوقود.

ويستعمل زيت الديزل في فترات بدء الحركة أو دوران الآلة بدون حمل، وتعمل منظومة الغاز الطبيعي المضغوط تلقائيًا بمجرد بدء المركبة في الحركة، ويتميز



استعمال الغاز الطبيعي المضغوط بانخفاض وهج الغاز وانعدام الانبعاثات الضارة وبالاقتصاد فى الطاقة، وتكمن المشكلة فى عبء وزن أسطوانة الغاز الإضافى.

لقد تم التأكد من الجدوى الفنية من استعمال الغاز الطبيعي المضغوط - كوقود - فى إيطاليا والأرجنتين ودول CIS<sup>(\*)</sup> ونيوزيلندا والولايات المتحدة وكندا، وفى الهند تجرى المركبات التى تعمل به فى جوجارات وتاميل نادو وأسام وتريبورا، ومنذ ديسمبر ١٩٩٢ يستعمل الغاز الطبيعي المضغوط فى بومباى فى تسيير حافلات النقل العام وسيارات الأجرة وبعض مركبات "الركشا" ضمن إطار برنامج تحسين البيئة على المستوى العالمى والتابع للمصرف الدولى.

وفى دلهى تجرى بعض وحدات أسطول لـ DTC<sup>(\*\*)</sup> هى الأخرى بالغاز الطبيعي المضغوط.

ولدى هيئة GAIL<sup>(\*\*\*)</sup> مشروع لتحويل ٦٣٩٢٠ سيارة تعمل بالوقود البترولى السائل إلى العمل بالغاز فى غضون ٦ سنوات، فى دلهى وبومباى وبارودا، وقد أنشئت بالفعل ثلاث محطات للضواغط فى تلك المدن، وتتولى هيئة IBP تنفيذ المشروع فى أسام وتريبورا.

ومن شأن استعمال الغاز الطبيعي المضغوط فى حافلات النقل العام والشاحنات أن يوفر نحو ٥٠% من وقود الديزل، ولن تحتاج السيارات لأى وقود سائل على الإطلاق، والسيارة المزودة بأسطوانتى غاز طبيعى مضغوط إلى ٢٠٠ ضغط جوى قادرة على قطع مسافة ١٠٠ كيلو متر، وحافلات النقل العام والشاحنات المزودة بست أسطوانات يمكنها قطع مسافة ٣٠٠ كيلو متر، وإذا ما نفذ

---

(\*) منظمة تضم الدول التى كانت تتبع الاتحاد السوفيتى السابق (المترجم)

(\*\*) اختصاراً لعبارة Delhi transport corporation (المترجم)

(\*\*\*) اختصاراً لعبارة Gas Authority of India (المترجم)

الوقود من الغاز الطبيعي المضغوط على الطريق، يمكن للمركبة أن تسير بالوقود التقليدي المعتاد بالتحول عن نظام الغاز الطبيعي إليه.

### الهيدروجين:

الهيدروجين وقود متجدد، فمادته الأولية (الماء) جد متوفرة، والطاقة الشمسية المبذولة في تحليل الماء للحصول على الهيدروجين متاحة هي الأخرى لملايين السنين القادمة، وعلاوة على ذلك، لا يسبب الهيدروجين في استخدامه كوقود أي تلوث، بل إنه ينتج الماء وهذا بمثابة تجديد لمادته الأولية، ومن ثم فإن الهيدروجين مصدر للطاقة صديق للبيئة ومصدر متجدد غير تقليدي لها، ومن أجل الوصول لهذا الهدف تطبق ذات القاعدة التي تستخدمها النباتات الخضراء في عملية التمثيل الضوئي، ففي هذه العملية ينقسم جزيء الماء إلى أكسجين وإلكترونات وأيونات هيدروجين ( $H^+$ ) ويمكن أن تتحول أيونات الهيدروجين هذه إلى هيدروجين غازي ( $H_2$ ) بالمقدور استعماله كوقود.

### الوقود الغازي الكحولي Gasohol:

وهو مزيج من الجازولين والكحول الإيثيلي يستعمل كوقود للمحركات دونما حاجة إلى تغيير تصميم الآلة المحركة.

### الهيدروكربونات:

بالوسع استعمال المركبات الهيدروكربونية التي تنتجها بعض الكائنات الحية الدقيقة في صورة وقود سائل أو غازي، فعلى سبيل المثال هناك غاز الميثان الذي تنتجه الميكروبات من البولييمرات كالكاربوهيدرات والبروتين والشحوم والدهون وما إلى ذلك، وتنتج الهيدروكربونات بالمثل الطحالب وحيدة الخلية من نوع *Botryococcus Braunii* التي تصل نسبة الهيدروكربون فيها إلى ٧٥% من وزنها الجاف، وهي أعلى نسبة تم التعرف عليها في أي نوع من الكيانات الحيوية.

الباب الثاني

الخلية الشمسية



## مقدمة:

بالنظر إلى محدودية الاحتياطات من الوقود الأحفوري والنووي، ستلعب المصادر المتجددة دوراً رئيسياً في إمدادات العالم المستقبلية من الطاقة، ومن بين مصادر الطاقة الجديدة المأمولة يمثل التحويل المباشر لضوء الشمس إلى كهرباء بديلاً مباشراً وواعداً، وتزود الخلايا الشمسية بالطاقة من خلال منظومات تتراوح مستويات قدراتها ما بين الملي وات والميجاوات.

وتعتمد الخلايا الشمسية في عملها على التأثير الكهروضوئي **Photovoltaic effect**، إذ تعمل الخلايا الشمسية على تحويل ضوء الشمس مباشرة إلى كهرباء، مستخدمة الخواص الإلكترونية لفئة من المواد تعرف بأشباه الموصلات (Semiconductors)، ومن الأسباب التي تدعو إلى الاهتمام العام على مستوى العالم بالاستثمار في البحوث في مجال التأثير الكهربى الضوئى:

أ- مخزونها الهائل من الطاقة على المدى الطويل، في كل مكان - تقريباً على سطح الأرض.

ب- نظراً للطبيعة الريفية والصناعات الزراعية التي تسود في البلاد النامية يمثل الحصول على الكهرباء من الشمس مدخلاً جذاباً للغاية، حيث إنها تيسر تواجد المنظومات المستقلة القائمة بذاتها، والتي لا تحتاج لوقود وتتمتع بدرجة عالية من الاعتمادية. علاوة على ذلك، فإن جميع الدول النامية تقريباً تقع داخل نطاق الحزام الشمسى من العالم، ويحيا نحو ٤٠% من تعداد سكان العالم في قرى تلك البلدان حيث تمثل لا مركزية توليد الكهرباء ضرورة حيوية.

ج- من المتوقع - خلال عقود عدة مستقبلية - أن تزيد دول العالم المتقدمة منها والنامية - استهلاكها من الكهرباء، على أن سؤالاً ضمناً سوف يصاحب هذه الزيادة:

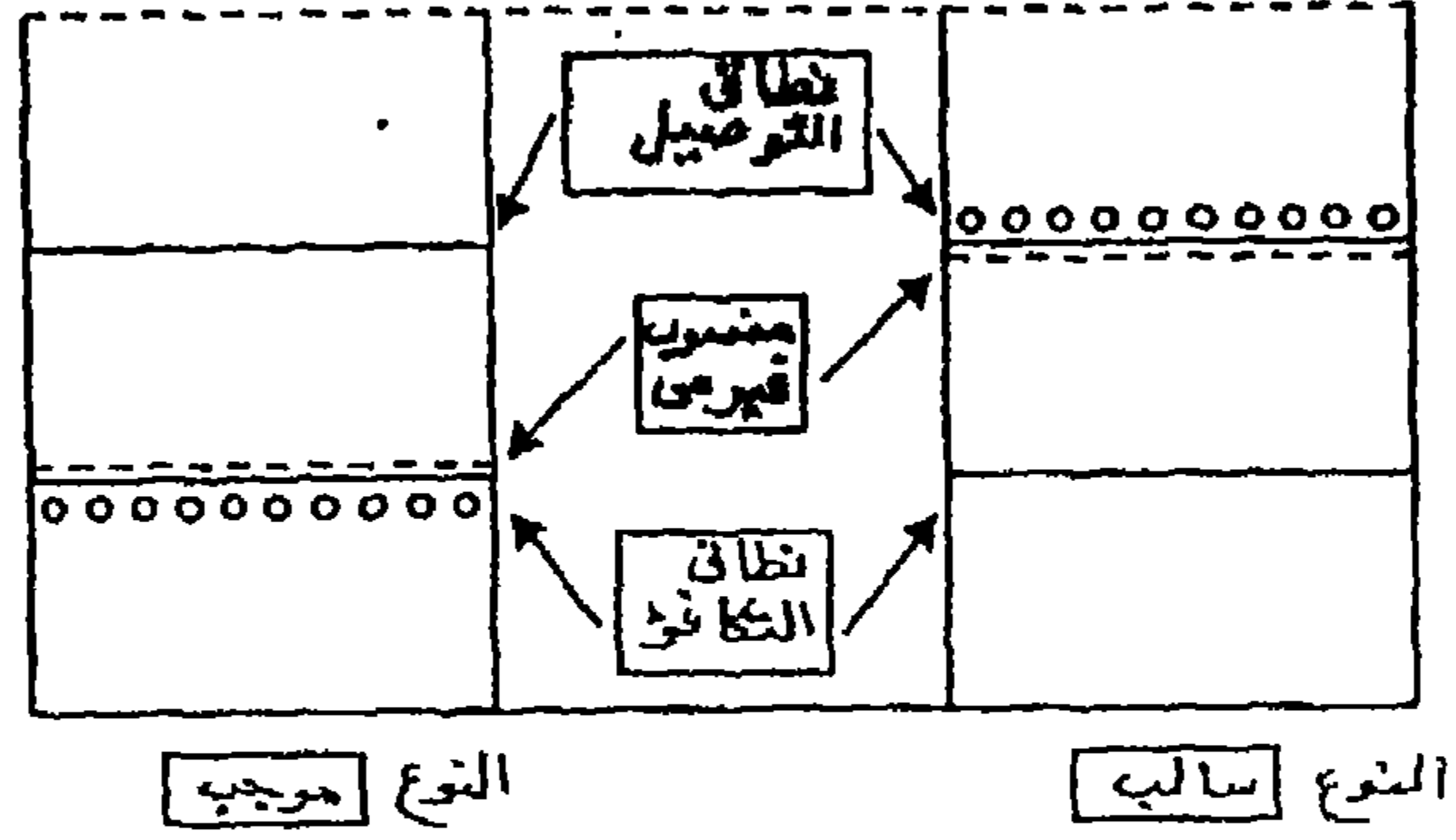
هل بوسعنا أن نرفع من استهلاكنا دون أن نزيد من مخاطر التدهور البيئي؟  
إن التأثير الكهربى - الضوئى الذى تتحول فيه طاقة الفوتونات - عن طريق تقنيات المادة وهى فى الحالة الصلبة - إلى كهرباء (electivity)، يمكنه أن يساهم مساهمة ضخمة فى سد الاحتياجات من الطاقة، وتتمثل سلبيات استعمال الظاهرة الكهربائية الضوئية فى ارتفاع التكلفة وعدم نضج تقنياتها، بيد أن عقداً من البحوث قد أحدث تقدماً فى هذه التقنية ووصل بها إلى نقطة اقتحمت معها أسواق الكهرباء كثيفة الاستخدام. إن التقدم فى مجال التأثير الكهروضوئى كفىل بأن يجعله واحداً من تقنيات العالم المفضلة لتوليد الطاقة الكهربائية.

### التأثير الكهروضوئى (الظاهرة الكهروضوئية):

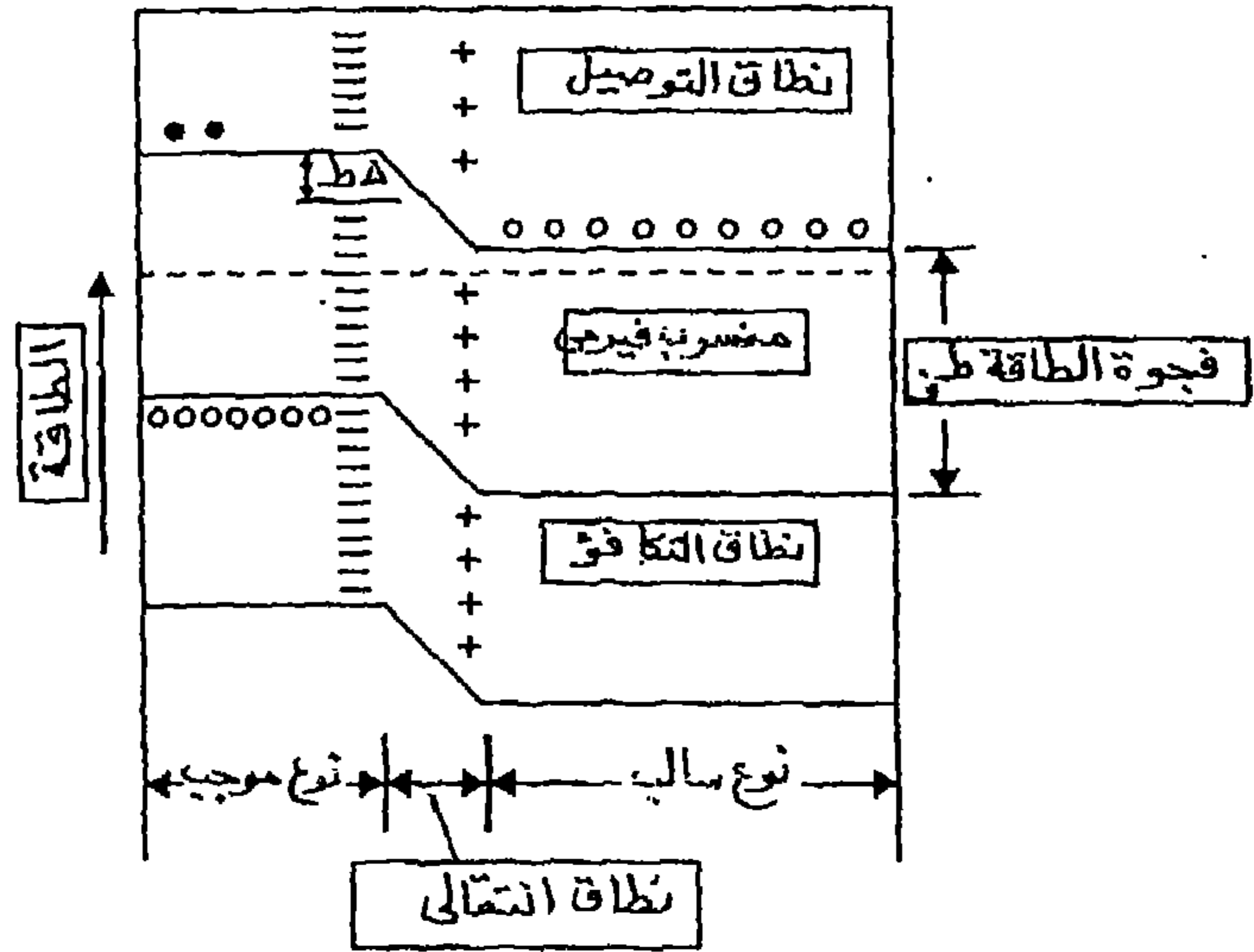
تستخدم وصلة من أشباه الموصلات من النوعين الموجب والسالب فى تصنيع الخلية الكهروضوئية، ويمكن تشكيل هذه الوصلة بإنماء بلورة شبه موصل منفردة، جزء منها من النوع الموجب والآخر من النوع السالب، ويصور شكل (٢ - ١) الرسم البيانى لنطاقات الطاقة للبلورات من النوعين الموجب والسالب قبل وصلهما ببعضهما، ويبين الشكل أيضاً بوضوح مستويات فيرمى<sup>(\*)</sup>، وعندما تدفع بلورتان معاً فإن الإلكترونات تتسرب من الجانب السالب إلى الجانب الموجب حيث تعود إلى الاندماج بالفتحات الحرة، وفى نفس الوقت تتسرب الفتحات الموجبة من الجانب الموجب إلى الجانب السالب، حيث تعود إلى الاتحاد بالإلكترونات الحرة.

---

(\*) يقصد بمستوى أو منسوب فيرمى Fermi level الحالة الكمومية التى تحتلها الطاقة الحركية للإلكترونات الحرة، وكما سيرد شرحه فى الباب التاسع (المترجم)



(أ)



(ب)

شكل (١-٢)

رسم بياني لنطاقات الطاقة لوصلة من نوع الموجب - السالب  
 (أ) لأشباه موصلات معزولة (من النوعين الموجب والسالب)  
 (ب) وصلة موجبة - سالبة بعد الوصول لوضع الاتزان



ويترك انتشار الإلكترونات الحرة شحنة موجبة صافية من الناحية السالبة في حين يخلف انتشار الفتحات الحرة شحنة سالبة صافية في الجانب الموجب، ويفضي هذا التوزيع للشحنة إلى خلق مجال كهربائي، ومن ثم تولد فرق جهد عبر الوصلة، إن فرق جهد  $\Delta$  طاقة ط عند نقطة الاتصال يتولد له في الحال من المقدار ما يوقف بالكاد أى انتشار أو تسرب إضافي لحاملات الشحنة.

وبسبب فرق جهد الاتصال تترشح مستويات طاقة الجانب الموجب إلى أعلى ومستويات طاقة الجانب السالب إلى أسفل، بحيث يتساوى منسوباً (فيرمى) على الجانبين، وتصل المنظومة إلى وضع الاتزان.

ويوضح شكل (٢-١ ب) الشكل البياني لنطاق الطاقة للدايود (\*) عند ظروف الاتزان النهائي في غياب أى مصدر خارجي للطاقة.

عندما يصطدم إشعاع شمسي كهرومغناطيسي ذو طاقات فوتونية أعلى من الفجوة في الطاقة (ط<sub>ف</sub>) بوصلة م - س (موجب - سالب) تكتسب الإلكترونات في نطاق التكافؤ طاقة كافية لكي تثب إلى نطاق التوصيل، وبالتالي تنتج أزواجاً من الإلكترونات والفتحات، ومهمة الوصلة أن تفصل بين هذه الثنائيات، فيهبط الإلكترون إلى أسفل (تل) فرق الجهد وإلى الجانب السالب، بينما تتجه الفتحات إلى أعلى (تل) الجهد وإلى الجانب الموجب، وينتج عن هذا الفصل تقليص ارتفاع تل الجهد، ويتم الوصول - في خاتمة المطاف - إلى شروط جديدة للاتزان عبر الوصلة بظهور فرق في الجهد، ويطلق على ذلك فولتية دائرة مفتوحة (ف.د.م) **open circuit voltage** وهي دالة في شدة الإشعاع الساقط، والآن إذا وصلت

---

(\*) الدايدود diode : أداة إلكترونية تحصر مرور التيار الكهربى في اتجاه واحد (المترجم)

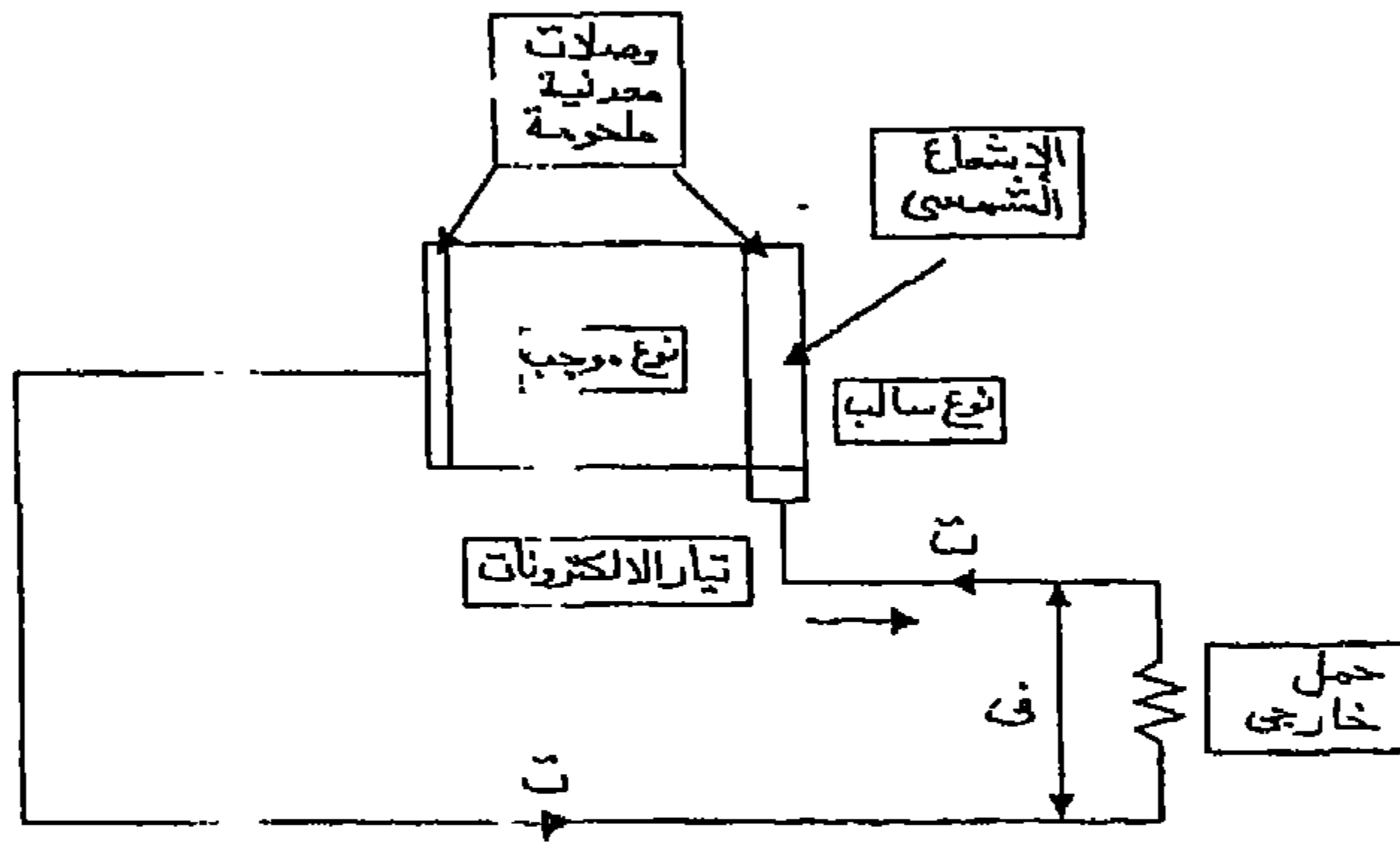
الوصلة بسلك خارجى يمكن إهمال مقاومته الكهربائية، فإن ثنائيات الإلكترون - الفتحة التى ولدتها الطاقة الشمسية ترغم على الانفصال وتمضى عبر تل الجهد بكامل ارتفاعه، وتيار القصر Short Circuit الذى يسود فى هذه الحالة هو الآخر دالة فى شدة الإشعاع الساقط، وفى شكل (٢-٢) وصلة ثنائية (موجب - سالب) تحت تأثير الإشعاع الشمسى.

فالثنائيات المتولدة المكونة من إلكترونيات وفتحات تنتقل إلى الدائرة الخارجية، حيث تبذل الشغل الذى نستفيد منه، وتوجد فى الدائرة الخارجية مقاومة كهربية، ومن ثم يلزم فرق جهد ملائم (ف) لسريان التيار، وفرق الجهد اللازم - بما يعادله من الطاقة المساوية لـ أ ف(\*) لابد من الحصول عليه بموجب فرق فى منسوبى فيرمى على جانبى الوصلة، أما وقد قلص فرق الجهد (أو تل الجهد) عبر الوصلة إلى  $\Delta$  ط - أ ف) (حيث  $\Delta$  ط هو تيار القصر عبر كامل ارتفاع تل الجهد)، فليست الوصلة الآن بالفاعلية التى تكفل فصل الثنائيات المكونة من إلكترونيات وفتحات والتى تولدت بفعل الطاقة الشمسية، كما هو الوضع مع حالة القصر.

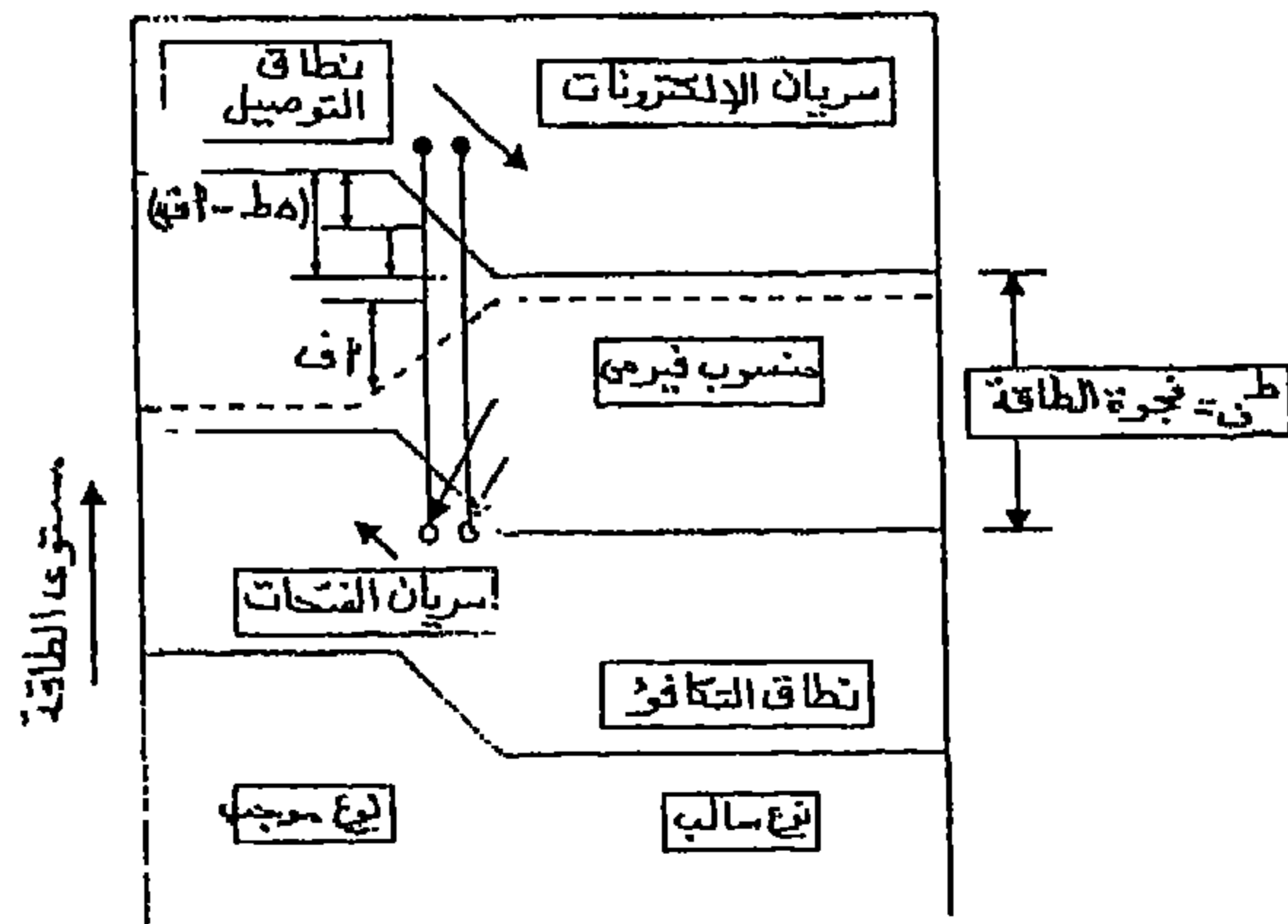
ونتيجة لذلك، فإن بعض حوامل الشحنة يمكنها الآن أن تتدبر أمرها وتعبر الوصلة فى الاتجاه الخاطئ، بما يعنى وجود تسرب فى التيار عند الوصلة (ت ر)، وبالتبعية نقصان فى قيمة التيار (ت) الواصل للحمل.

---

(\*) أ هنا ترمز إلى شحنة الإلكترون .



(أ)



(ب)

شكل (٢-٢)

كيفية عمل الوصلة الكهروضوئية

(أ) رسم تخطيطي للوصلة الثنائية (الموجب - السالب)

(ب) الرسم البياني لمستويات (مناسيب) الطاقة

## تيار الوصلة (ت و):

تيار الوصلة (ت و) هو صافى قيمة التيار المحصل السارى من الناحية الموجبة إلى الجانب السالب نتيجة كل حوامل الشحنة، والأقلية من حاملات الشحنة (الإلكترونات فى الجانب الموجب والفتحات فى الجانب السالب) يمكنها اجتياز الوصلة فى يسر، إذ أن الإلكترونات تفضل هبوط نل الجهد فى حين تؤثر الفتحات الصعود إلى أعلاه.

وتستطيع أغلبية حاملات الشحنة أن تعبر الوصلة إلا إذا كان لديها طاقة تزيد عن الحاجز الذى قيمته  $(\Delta - \text{ط} - \text{أ ف})$ ، وحيث إن حاملات الشحنة تميل إلى اتخاذ توزيع ماكسويل (\*)  $\text{Maxwellian distribution}$  فالنسبة من أغلبية الحاملات التى تفلح فى القيام بهذه الرحلة هى  $-\left(\frac{\Delta - \text{ط} - \text{أ ف}}{\text{بو. د}}\right)$ ، حيث بو هى ثابت بولتزمان (\*\*)، د هى درجة الحرارة المطلقة، ولصياغة قيمة (ت و) فى معادلة سنفترض الآتى:

ث ١ = كثافة الإلكترونات فى الجانب الموجب.

ث ٢ = كثافة الفتحات فى الجانب الموجب.

ث ٣ = كثافة الإلكترونات فى الجانب السالب.

ث ٤ = كثافة الفتحات فى الجانب السالب.

---

(\*) توزيع ماكسويل  $\text{Maxwellian distrilution}$  : يقصد به نموذج توزيع قيم سرعة الجزيئات لغاز فى

توازن حرارى. (المترجم)

(\*\*) ثابت بولتزمان : هو ثابت فيزيائى يربط طاقة الجزيئات بدرجة الحرارة ومقداره  $1.38 \times 10^{-23}$

جول/ درجة مطلقة. (المترجم)

ت<sub>١</sub> = تيار الإلكترونات من الجانب الموجب إلى الجانب السالب.

ت<sub>٢</sub> = تيار الفتحات من الجانب الموجب إلى الجانب السالب.

ت<sub>٣</sub> = تيار الإلكترونات من الجانب السالب إلى الجانب الموجب.

ت<sub>٤</sub> = تيار الفتحات من الجانب السالب إلى الجانب الموجب.

ومن هنا فإن:

$$ت_١ = ك_١ ث_١$$

$$ت_٢ = ك_٢ ث_٢ هـ - \left( \frac{\Delta ط - أ ف}{ب. د} \right)$$

$$ت_٣ = ك_٣ ث_٣ هـ - \left( \frac{\Delta ط - أ ف}{ب. د} \right)$$

$$ت_٤ = ك_٤ ث_٤$$

حيث ك<sub>١</sub>، ك<sub>٢</sub>، ك<sub>٣</sub>، ك<sub>٤</sub> مقادير ثابتة، فيكون محصلة التيار الصافي الساري من الجانب الموجب إلى الجانب السالب = ت<sub>و</sub> = ت<sub>١</sub> + ت<sub>٢</sub> + ت<sub>٣</sub> + ت<sub>٤</sub>

$$= (ك_١ ث_١ + ك_٢ ث_٢ + ك_٣ ث_٣) + (ك_٤ ث_٤) هـ - \left( \frac{\Delta ط - أ ف}{ب. د} \right) \quad (١-٢)$$

وتصح المعادلة رقم (١-٢) عندما تكون الوصلة في وضع اتزان مع عدم وجود (تدفق إضافي) (ت<sub>و</sub> = ٠، ف = ٠)

$$\text{من المعادلة رقم (١-٢): } (ك_١ ث_١ + ك_٢ ث_٢ + ك_٣ ث_٣) هـ - \left( \frac{\Delta ط}{ب. د} \right) = ٠$$

$$(٢-٢)$$

وينبغي أن تكون المعادلة (٢-١) صحيحة أيضاً لدى قيم (ف) السالبة، وعندما تكون هذه القيمة السالبة مرتفعة عددياً بما يكفي، فيمكننا إهمال الحد الثانى من المعادلة (٢-١) فنحصل على:

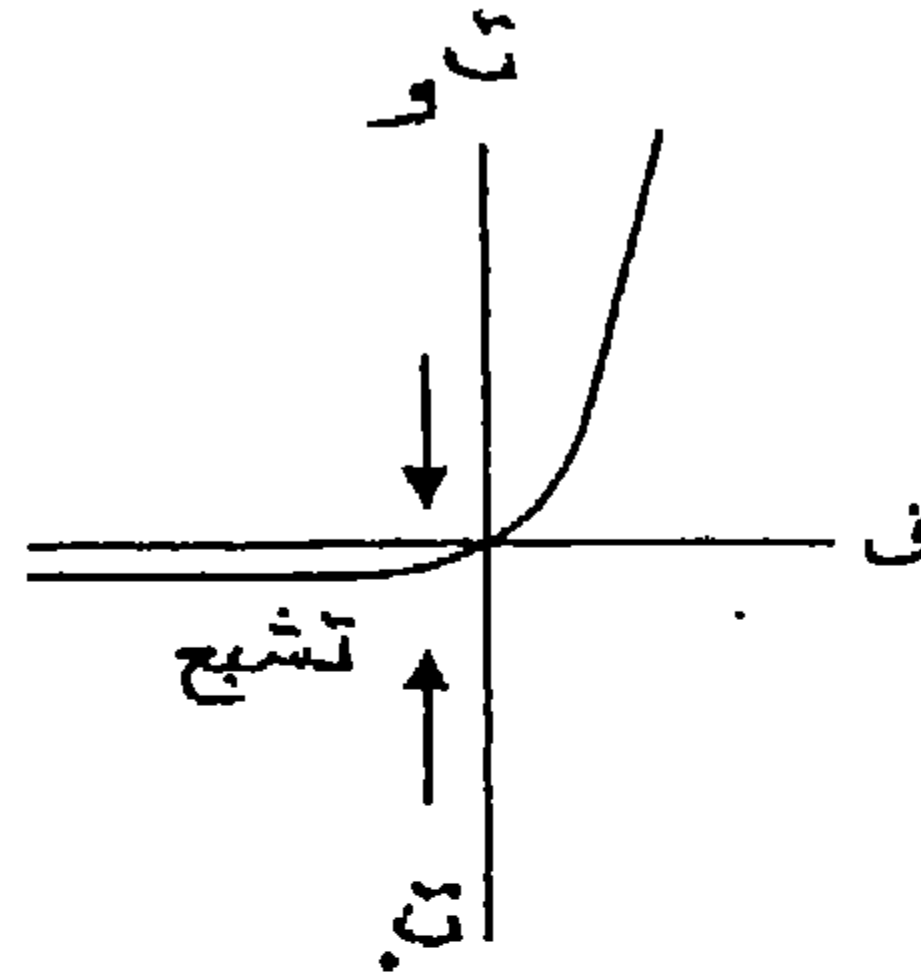
$$ت_و = - (ك_١ ث_١ + ك_٢ ث_٢) = - ت. \quad (٢-٣)$$

وهكذا فعند قيمة عالية لفرق جهد سالب (ف)، ستوقف الوصلة الثنائية (الموجب - السالب) (م - س) كل حاملات الشحنة الأغلبية، وتسمح فقط بمرور حاملات الشحنة الأقلية عبر الوصلة، مولدة تياراً معاكساً قيمته (ت.) (يطلق عليه التشبع العكسى أو تيار الإظلام)<sup>(\*)</sup>.

ومن المعادلات (٢-١)، (٢-٢)، (٢-٣) نصل إلى أن  $ت_و = ت.$  [هـ ب.و.د. - ١]

$$(٢-٤)$$

والمعادلة (٢-٤) تعطى علاقة التيار بفرق الجهد لوصلة دايود ثنائية (موجب - سالب)، ويوضح شكل (٢-٣) صورة هذه العلاقة.



شكل (٢-٣)

علاقة التيار بفرق الجهد لوصلة دايود

---

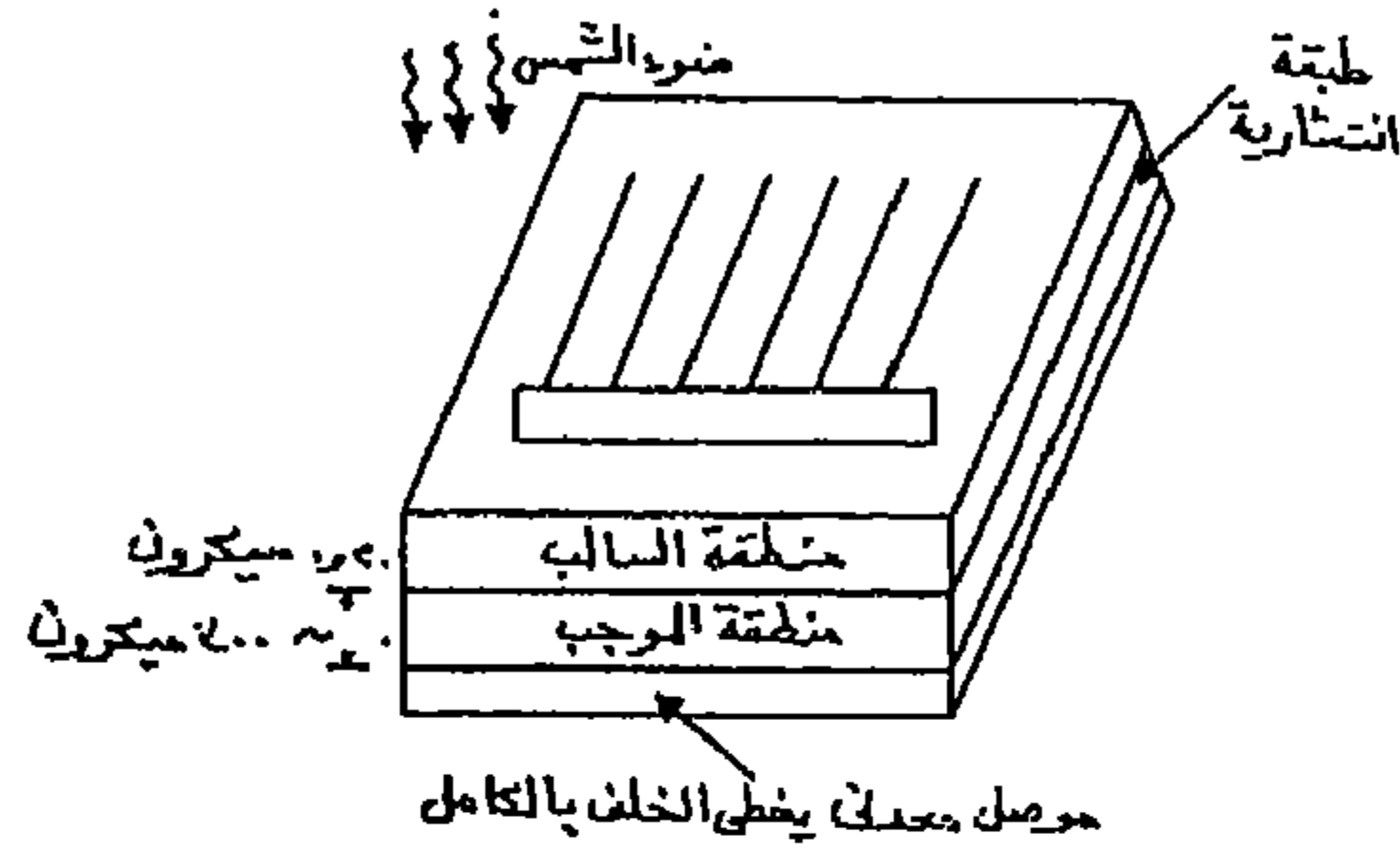
(\*) تيار الإظلام : Dark current هو التيار الكهربى فى دائرة خلية ضوئية عند انقطاع الضوء عنها  
(المترجم)

## أداء الخلية الشمسية:

يبين شكل (٢-٤) الملامح الأساسية في الخلية الشمسية، وهي مكونة من رقائق من السليكون المتبلر المعالج بالبورون، وهو أصلح أشباه الموصلات في الوقت الحاضر، والذي يعالج بالبورون وهو من شوائب العضو المستقبل لهذا الغرض (\*).

ويمكن أن تتخذ الخلية والتي يبلغ سمكها نمطيًا ثلث المليمتر شكلًا مربعًا، أو دائريًا أو نصف دائري، وتبلغ مساحة سطحها ١٠٠ مم مربع.

ويتسرب الفسفور (وهو من شوائب الجزء المانح Doner) (\*\* بين رقائق السليكون عند درجة ٨٥٠ م تقريبًا، مكونًا وصلة ثنائية (موجب - سالب) تحت سطح الواجهة بجزء من الميكرون، ويتخذ الاتصال الأمامي شكل شبكة كالأصابع، في حين يغطي الاتصال الخلفي عادة كامل السطح الخلفي، وعادة ما يطل السطح الأمامي بطبقة مانعة لانعكاس الأشعة.



شكل (٢-٤)

رسم تخطيطي لتركيب خلية شمسية نمطية ومكوناتها

(\*) **acceptor impurity** : يقصد بها عنصر كالجاليوم يضاف خصيصًا لأشباه الموصلات لزيادة

توصيلية النوع السالب بزيادة عدد الفتحات (المترجم)

(\*\*) **Doner impurity** : يقصد بها عنصر كالأنثيمون أو الزرنيخ يضاف خصيصًا لمادة شبه الموصل

لزيادة توصيلية النوع السالب (المترجم)

تنساب إلكترونات التوصيل - عند الوصلة - من الجانب السالب إلى الجانب الموجب، فتقترن بالفتحات، وتعادل شحناتها. وبالمثل تتحرك الفتحات من النطاق الموجب إلى النطاق السالب. ونتيجة لذلك تختفى الإلكترونات والفتحات بالقرب من الوصلة فيما يسمى بمنطقة النضوب أو النفاد depletion area، والتي يصل عرضها إلى ما بين  $10^{-4}$  إلى  $10^{-6}$  سنتيمتر، مخلفة وراءها طبقات من ذرات الشوائب المشحونة (بشحنة موجبة في الجانب السالب وشحنة سالبة في الجانب الموجب). ويتولد من التلامس فرق جهد له طاقة  $\Delta$  ط عبر الوصلة، مقدارها يكفي بالكاد لمعاوقة أى تدفق أكثر من الإلكترونات والفتحات نتيجة منحدر التركيز<sup>(\*)</sup> concentration gradient. ويسبب جهد الاتصال هذا تحرك مستويات الطاقة في نطاق المنطقة السالبة إلى أسفل كما يصعد نطاق المنطقة الموجبة إلى أعلى بحيث يبقى منسوباً فرمى للمنطقتين أفقياً ومستديماً لدى الوصلة. وعندما يسقط الضوء على سطح نشط تتفاعل الفوتونات ذات الطاقة التى تتجاوز فجوة الطاقة ط<sub>ب</sub> لشبه الموصل (ومقدراها 1,1 إلكترون فولت في حالة السيلكون) مع إلكترونات التكافؤ وترفعها حتى نطاق التوصيل. ويخلف هذا التحرك في مكانه فجوات. وفي حالة السليكون المتبلر تتولد حاملات الطاقة عبر سمك الخلية كله في تركيزات تعتمد على شدة الضوء وعلى تركيبه الطيفي. ولكي تفرغ هذه الثنائيات طاقتها في دائرة خارجية ينبغي أن يفصل الإلكترون سالب الشحنة عن الفجوة موجبة الشحنة. وبالإمكان التوصل إلى هذا الفصل عن طريق مجال الوصلة الداخلى فى الطبقة الناضبة. والإلكترونات المتولدة فى الجانب الموجب، والفجوات المتولدة فى الجانب السالب (وهى الأقلية من حاملات الطاقة) ستجذب إلى المجال وتنساب صوب الجانبين السالب والموجب على الترتيب، ومن ثم يتقلص مقدار الحواجز barriers وسيكون هناك فرق جهد كهربى فى الوصلات الخارجية للدايود بما يتيح توليد

(\*) يقصد بمنحنى التركيز التغير التدريجى فى تركيز مادة مذابة فى محلول كدالة فى المسافة. (المترجم)



قدرة لتشغيل حمل خارجي. ويمكن تلخيص المتطلبات اللازمة للحصول على خلية شمسية ذات كفاءة فيما يلي:

(١) امتصاص ما يكفي من ضوء الشمس بما يتيح تولد الثنائيات المكونة من إلكترونات وفجوات.

(٢) ينبغي الفصل ما بين الإلكترونات والفتحات في الثنائيات المتولدة.

(٣) فرق الجهد المتولد يتوجب أن يكون بالكبر الكافي، إذ أنه يحدد أقصى فولتية نحصل عليها من الخلية.

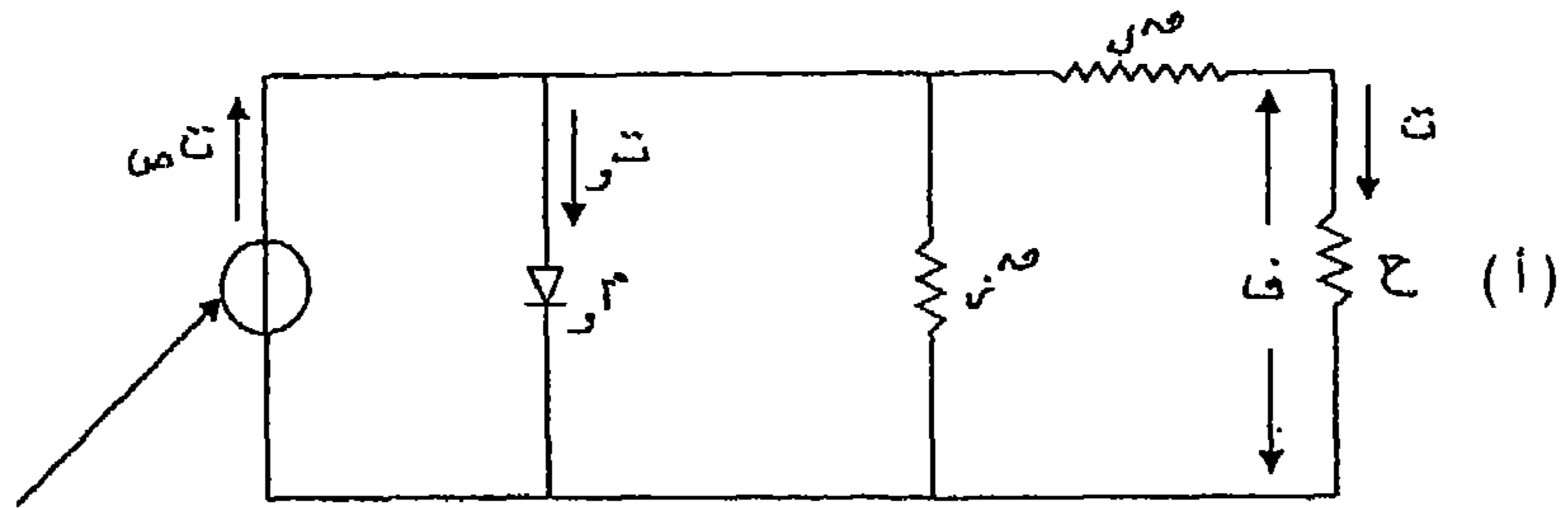
(٤) الهبوط في الجهد بسبب المقاومة الكهربائية الدخيلة غير المرغوب فيها يجب تقليله قدر الإمكان

(٥) الغطاء الشبكي المعدني ينبغي أن يكون صغيراً، لأن الطبقات المعدنية السميكة غير شفافة.

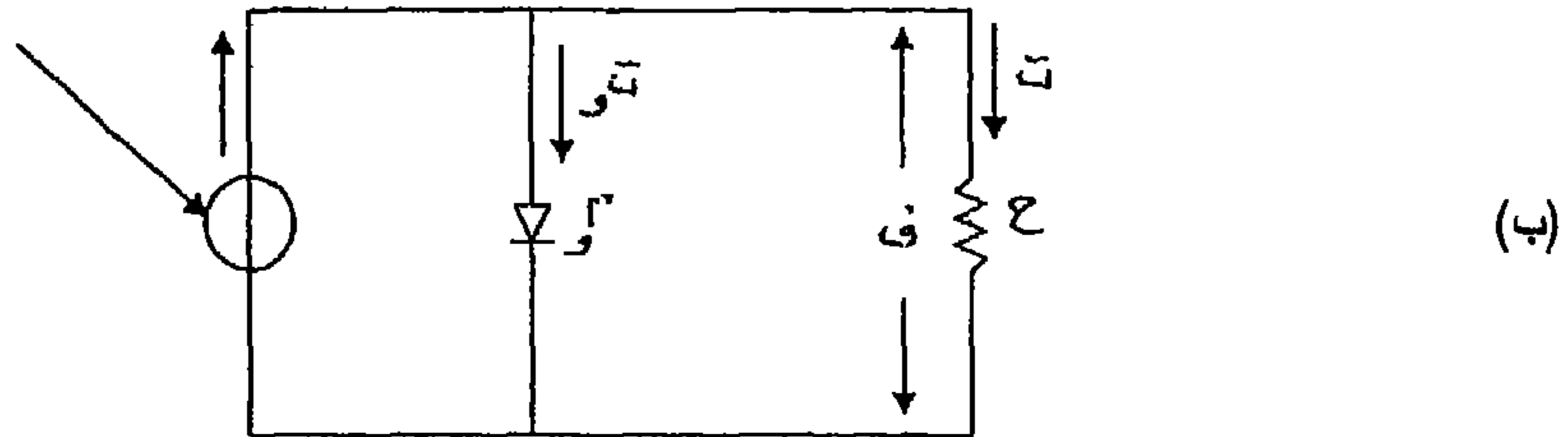
وينتج عند التفاعل بين ضوء الشمس والخلية الشمسية العمليات التالية:

- (١) انعكاس جزء من القدرة وارتدادها من على سطح الخلية.
- (٢) عملية امتصاص ينجم عنها توليد ثنائيات من الإلكترونات والفتحات، وامتصاص دخیل غير مرغوب يؤدي إلى أثر حراري. وهناك جزء من ضوء الشمس لا يمتص وإنما ينتقل خلال الخلية.
- (٣) انفصال حاملات طاقة ضوئية متولدة وتجمعها.
- (٤) سريان حاملات الطاقة نحو الوصلات الخارجية.
- (٥) إفراغ القدرة الضوئية المتولدة في حمل خارجي.

ولتحليل أداء الخلية يمكن عمل نموذج مكبر أو عياني لهذه العملية (الميكروسكوبية) في شكل دائرة كهربائية مكافئة (شكل ٢-٥) تتكون من مصدر تيار تعتمد شدته على الضوء يصدر تيارا مقداره  $I_L$  من شبكة من المقاومات تضم وصلة ذات مقاومة  $R_s$ ، ومقاومة داخلية موصلة على التوازي  $R_p$ ، ومقاومة داخلية موصلة على التوالي  $R_{sh}$  إلى جانب الحمل الخارجي  $R_L$ .



مصدر تيار ثابت  
يعتمد على كمية الضوء



شكل (٢-٥)

دائرة مكافئة لخلية شمسية  
أ - النموذج الفعلي      ب - النموذج المبسط

وعادة ما تكون مقاومة التوازي ذات قيمة أعلى كثيرا من مقاومة الحمل الخارجي، بحيث يسرى معظم التيار المتاح خلال الحمل، في حين تكون مقاومة التوالي الداخلية أقل كثيرا من مقاومة الحمل الخارجي بحيث لا تستهلك إلا أقل

القدرة داخليا في نطاق الخلية (يوضح شكل ٥-٢ أ الدائرية الفعلية، والتي يبسطها شكل ٥-٢ ب بهدف التحليل دونما إخلال كبير بالوضع الفعلي).

وحسب الدائرة المبسطة يمكن التعبير عن تيار الحمل الخارجى بالصورة

$$I_c = I_s - I_o \quad (5-2)$$

$$I_c = I_s - I_o \left(1 - \frac{I_{sc}}{I_o}\right)$$

وعند شروط القصر Short circuit (ف = ٠) يكون  $I_c = I_s$ ، وهو تيار القصر الذى يولده مصدر التيار المعتمد على الضوء، وتحت شروط الدائرة المفتوحة Open circuit ( $I_c = 0$ )، تعطينا المعادلة (٥-٢) أقصى قيمة لجهد الدائرة المفتوحة  $V_{oc}$ .

$$I_o \left(1 - \frac{I_{sc}}{I_o}\right) = I_s \quad \text{هـ}$$

$$I_{sc} = I_o \left(1 - \frac{I_{sc}}{I_o}\right) \quad \text{و هـ}$$

والقدرة الناتجة  $P$  من الخلية الكهروضوئية =  $P = I_c \cdot V$ ، ولشدة ضوء معينة، تتوقف القدرة الناتجة على قيمة مقاومة الحمل  $R_L$ :

$$P = I_c \cdot V = I_s \cdot V \left(1 - \frac{I_{sc}}{I_o}\right) \quad \text{ق} \quad (6-2)$$

وبمفاضلة المعادلة (٦-٢) بالنسبة لـ (ف) ومساواة النتيجة بالصفر يمكن الحصول على قيمة فرق جهد الحمل الخارجى  $V_{oc}$  الذى يناظر أقصى قدرة تنتجها الخلية:

$$[I_t - (I_t \cdot \frac{A_f}{B_o \cdot D})] + [I_f - (I_f \cdot \frac{A_f}{B_o \cdot D})] = [I_t - (I_t \cdot \frac{A_f}{B_o \cdot D})] + [I_f - (I_f \cdot \frac{A_f}{B_o \cdot D})]$$

$$\frac{A_f}{B_o \cdot D} = 1 + \frac{I_f}{I_t} \quad (7-2)$$

وهكذا، بمعرفة  $I_t$ ،  $I_f$ ،  $D$  يمكن تحديد قيمة  $A_f$  عن طريق التجربة. وقيمة تيار الحمل  $I_t$  الذى يناظر القيمة القصوى للقدرة المنتجة يمكن الحصول عليه بالتعويض من المعادلة (7-2) فى المعادلة (2-6).

$$I_t = I_t \cdot \frac{A_f}{B_o \cdot D} \quad [I_t - (I_t \cdot \frac{A_f}{B_o \cdot D})]$$

$$I_t = I_t \cdot \frac{A_f}{B_o \cdot D} \quad [I_t - (I_t \cdot \frac{A_f}{B_o \cdot D})]$$

$$= \frac{A_f}{B_o \cdot D} \div [I_t - (I_t \cdot \frac{A_f}{B_o \cdot D})]$$

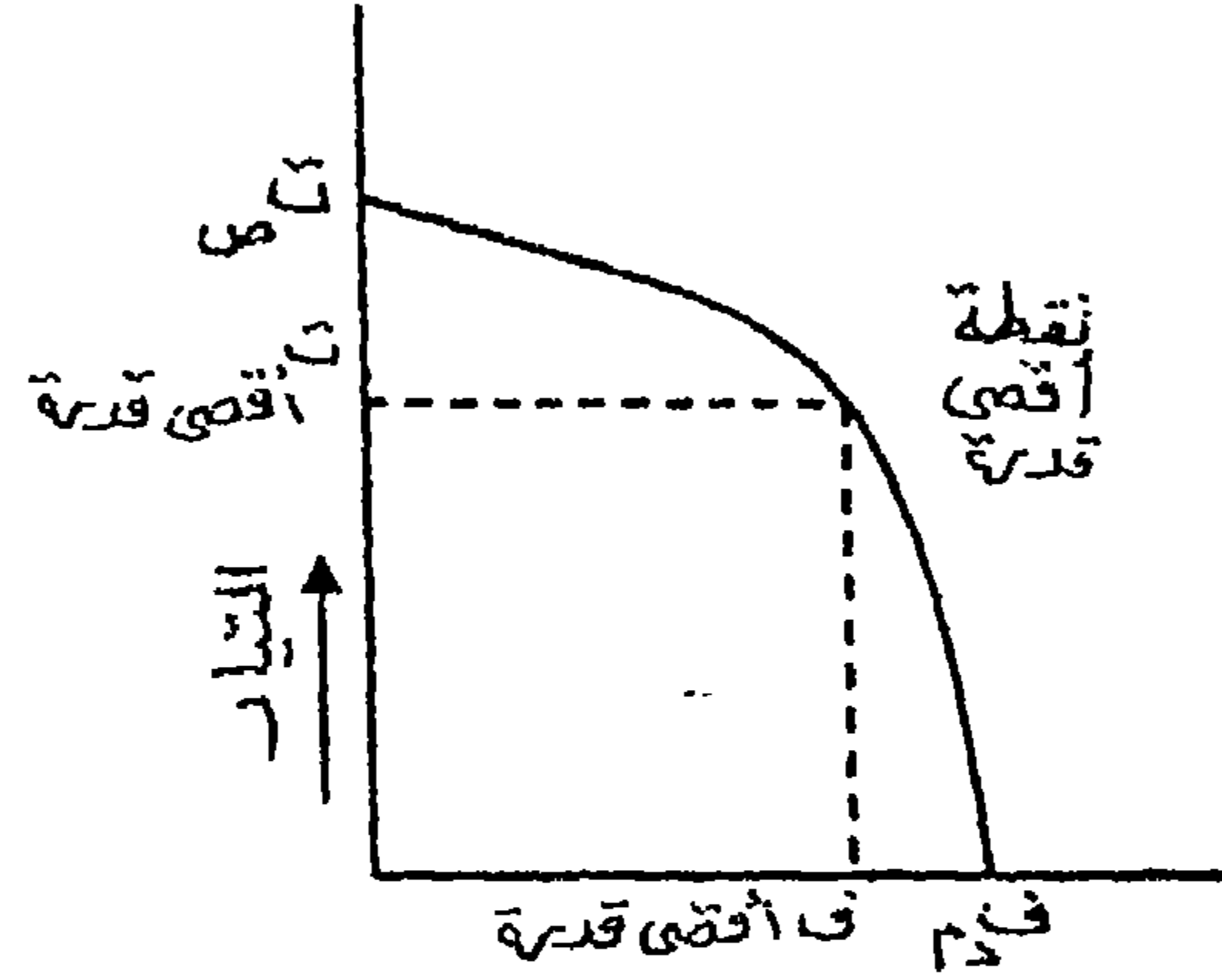
وأقصى قدرة يمكن الحصول عليها من الخلية  $Q = I_t \cdot A_f$

$$= \frac{A_f}{B_o \cdot D} \div (I_t - (I_t \cdot \frac{A_f}{B_o \cdot D}))$$

ويصور شكل (2-6) علاقة نمطية بين الفولت والتيار عبر حمل لخلية شمسية تحت ظروف إضاءة بعينها.

والقيمة القصوى للقدرة تحدث مع الحد الأقصى لقيمة  $I_t$  (حاصل ضرب الفولتية فى التيار)، ويحدث ذلك عندما يكون للمستطيل الواقع داخل منحنى العلاقة بالشكل. أقصى مساحة عند قيمة معينة للقدرة المدخلة للخلية الشمسية، وتعطى كفاءة التحويل التى تحقق أقصى قدرة منتجة من العلاقة لأقصى قدرة

$$= \frac{Q_{\text{أقصى قدرة}}}{Q_{\text{مدخلة}}}$$



شكل (٢-٦)

علاقة الفولت بالتيار عبر الحمل لخلية شمسية نمطية

وهناك العديد من العوامل الداخلة في تشغيل الخلايا الشمسية، والتي تحد من كفاءة تحويل الطاقة إلى حدود ٢٠ إلى ٣٠%، ويأتي هذا التحديد أساسًا كنتيجة تجاوب الخلية مع جزء فقط من الأطوال الموجية المتاحة بالطيف الشمسي، فالفوتونات ذات الطول الموجي الذي يزيد عن ٢٢,٢ ميكرون ليس لها من الطاقة ما يكفي لتوليد ثنائيات الإلكترونات - الفتحاحات في خلية شمسية - سليكونية، وطاقة الفوتون الفائضة لا تسهم في قيمة التيار المتولد. والطاقة التي لا تستخدم في إفراز أزواج من الإلكترونات - الفتحاحات تزيد - فقط - من درجة حرارة الخلية الشمسية.

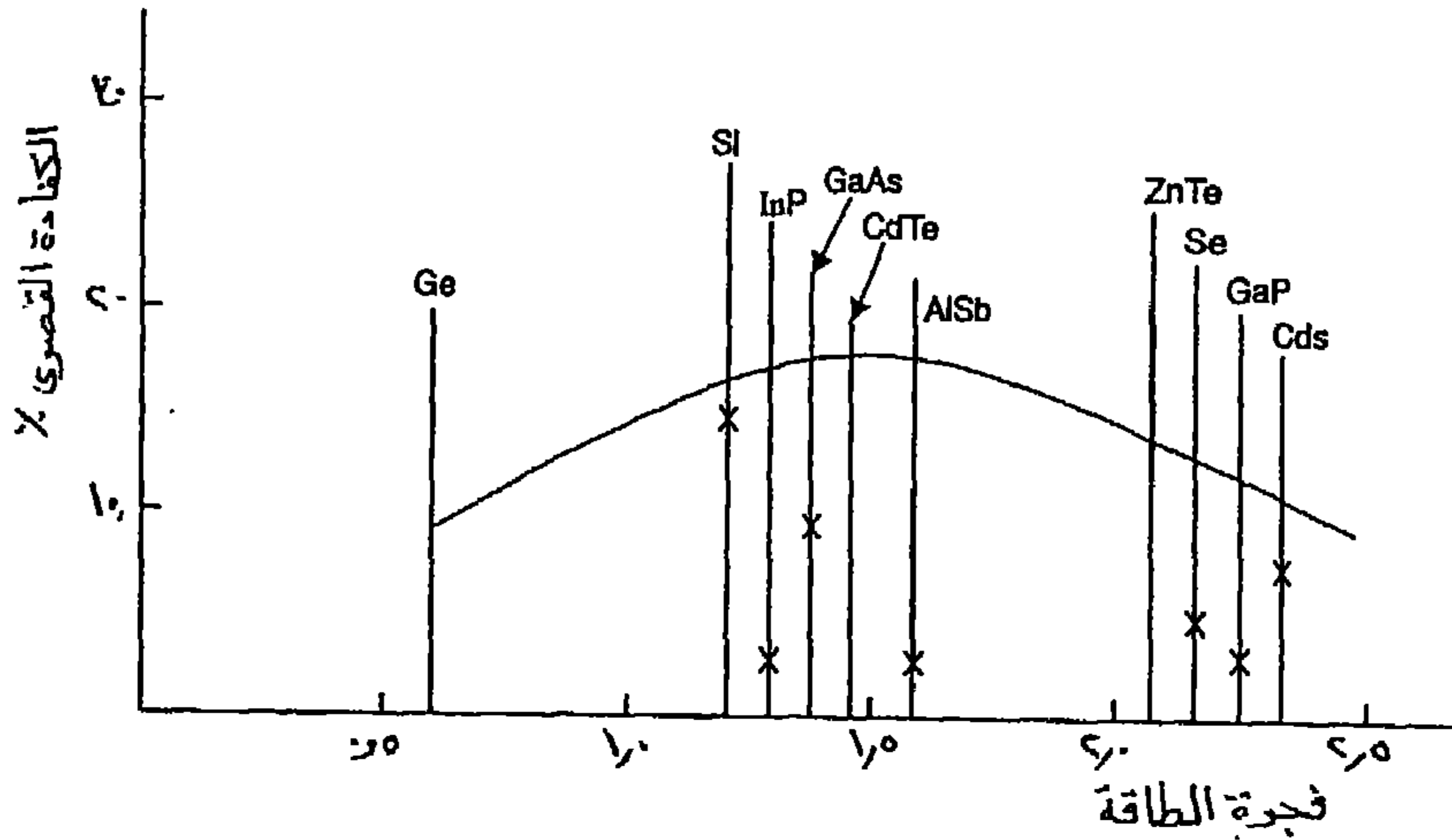
والتأثير الحراري في تذبذبات الشبكة يشجع حاملات الطاقة على اجتياز تل فرق الجهد وعبور الوصلة في الطريق الخطأ، مما يضيف تأثيرًا سلبيًا على كفاءة تحويل الطاقة، وعلى ذلك فلا بد من عكس الجزء غير المرغوب فيه من الإشعاع الساقط للاحتفاظ بالخلية في درجة حرارة منخفضة.

## اختيار المواد:

عادة ما يحدث التأثيران التاليان في مواد أشباه الموصلات المستخدمة في محولات الطاقة الشمسية:

(١) يقل عدد الفوتونات الممتصة ذات الطاقة الأعلى من فجوة النطاق بازدياد فجوة النطاق، وبازدياد فجوة النطاق تنخفض كثافة تيار التشبع (ت.٠) وبالتالي يرتفع فرق الجهد المتولد.

(٢) هناك ملحوظة نوعية عن أن انخفاض (ت.٠) نتيجة ازدياد فجوة النطاق، يزيد من قيمة فولتية الدائرة المفتوحة، في علاقة تناسب مع لوغاريتم النسبة  $\frac{ت.٠}{ت.٠}$ .



شكل (٧-٢)

أقصى قيمة لكفاءة تحويل الطاقة الشمسية كدالة في فجوة الطاقة لشبه موصل، ومبين بالرسم قيم أقصى كفاءة تم قياسها لمختلف المواد بعبور فجوة الطاقة لهذه المادة  
رسم المنحنى البياني على أساس (وصلة مثالية) خارج الجو

يبين شكل (٢-٧) تأثير هذين العاملين على الحد الأقصى لكفاءة التحويل لمحول كهروضوئي، وهذا المنحنى الذى توصل إليه لوفرسكى Loverski، يعطى أقصى كفاءة نظرية، على أية حال، فالمنحنى يتنبأ بقيم للكفاءة القصوى أعلى من كفاءة أشباه الموصلات السليكونية ذات فجوات طاقة ما بين ١,١، ٢,٣ إلكترون فولت، وتشمل المواد التى لها فجوات طاقة فى هذا النطاق: فوسفيد الأنديموم ( $I_n P$ ) (١,٢٧ إلكترون فولت) وزرنيخ الجاليوم ( $G_a A_s$ ) (١,٣٥ إلكترون فولت)، وأنتيمونيد الألومنيوم ( $AlS_b$ ) (١,٤٩ إلكترون فولت)، وتيلوريد الكاديوم ( $Cd Te$ ) (١,٥ إلكترون فولت)، وتيلوريد الزنك ( $Z_n T_e$ ) (٢,١ إلكترون فولت)، وزرنيخ الألومنيوم ( $AlA_s$ ) (٢,١٦ إلكترون فولت)، وفوسفيد الجاليوم ( $G_a P$ ) (٢,٢٤ إلكترون فولت)، ويضم هذا النطاق من فجوات الطاقة بالمثل خلائط من أشباه الموصلات تتكون من مواد شبه موصلة من طوائف III-V، II-VI (عناصر المجموعتين ٣، ٥ أو ٢، ٦ من جدول العناصر الدورى) بنسب متباينة، وكمثال على هذه المواد مادة  $G_a As_x P_{x-1}$  التى تقع فجوة طاقتها ما بين ١,٣٥ إلكترون فولت (القيمة الخاصة بزرنيخ الجاليوم)، ٢,٢٤ إلكترون فولت (القيمة الخاصة بفوسفيد الجاليوم)، والمواد الأخرى ذات قيم فجوات طاقة تؤهلها للاستخدام فى وصلات هذا النوع من محولات الطاقة تتكون من اثنين من أشباه الموصلات (وتسمى الوصلات متعددة المواد) مثل السيلينيوم  $S_e$  وسيلينيد الكاديوم ( $C_d S_e$ )، وسلفيد الكاديوم ( $C_d S$ ) مع كبريتيد النحاس ( $C_u S$ ).

## العوامل التى تحد الأداء:

### تحد العوامل الآتية من أداء الخلايا الشمسية:

- (١) الفاقد بالانعكاس: فبعض الإشعاع الساقط يفقد بالانعكاس على سطح الخلية والمادة المستخدمة لوقايتها من الظروف الجوية، وتتراوح نسبة الفاقد بالانعكاس فى خلية مطلية بمادة مضادة للانعكاس ما بين ٥، ١٠%.

(٢) الامتصاص غير المكتمل: الفوتونات التي تقل طاقتها عن فجوة الطاقة سيقصر أمرها على توليد حرارة في الخلية، ويزيد هذا الفاقد كلما زادت قيمة فجوة الطاقة.

(٣) الاستفادة الجزئية من طاقة الفوتونات: يكون لكثير من الفوتونات التي تفرز ثنائيات الإلكترونات - الفتحات من الطاقة ما يربو على ما يلزم لهذه العملية، وتنتشر هذه الطاقة الزائدة في شكل حرارة، وعلى ذلك، فكلما زادت فجوة الطاقة قل الفاقد، فإذا ما أخذنا في الحسبان عاملَي الفقدان الثاني والثالث، وجدنا أن شبه موصل ذا فجوة طاقة ٠,٩ إلكترون فولت هو أحسن ما يتبع لطيف AMO وفي المواد ذات معاملات الامتصاص المرتفعة مثل السليكون غير المتبلر و زرنيخ الجاليوم، يقل سمك الخلية اللازم عن حالة السليكون المتبلر. وفي الحالة الأخيرة يصل السمك المطلوب لامتصاص ٩٠% من الإشعاع إلى ٣٠٠ ميكرون.

(٤) فاقد التجميع: حاملات الطاقة التي تبلغ الوصلة قبل عودة الاندماج هي فقط التي تتجمع وتسهم في التيار المتولد، في حين أن سواها تنتج حرارة فقط، وكفاءة التجميع هي النسبة ما بين كثافة تيار قصر الدائرة الفعلى، وكثافة تيار القصر الحادث في حالة عدم عودة الاندماج.

والعوامل التي تؤثر في كفاءة التجميع هذه هي:

أ - خواص الامتصاص لشبه الموصل، والتي تحدد التوزيع الهندسي لثنائيات الإلكترون - فتحة المتولدة في البلورة.

ب- عمق الوصلة.

ج - عرض الطبقة المستنفدة depletion layer.



د- المعدل الذى تتدمج به الإلكترونات والفتحات عند السطح (أى سرعة عودة الاندماج السطحى).

هـ- المسافة التى ينتقلها الإلكترون فى المنطقة الموجبة، وتنتقلها الفتحة فى المنطقة السالبة قبل عودة الاندماج (طول مدى الانتشار للأقلية من حوامل الطاقة).

و- وجود وشدة أى مجالات كهربية متولدة من تدرج منحدرات تركيز الشوائب عند مناطق السطح والقاعدة، والتى من شأنها أن تساعد على تسارع حركة حاملات الطاقة صوب الوصلة، ويجوز أن تتراوح كفاءة التجميع بين ٩٥% (خلية شمسية مفردة من نوع السليكون المتبلر ذات كفاءة عالية)، ٥٠% فى الخلايا منخفضة الكفاءة دقيقة السمك.

٥) عامل الفولتية: تكون فولتية الدائرة المفتوحة دائماً أقل من فجوة الطاقة للأسباب التالية:

أ - فولتية الدائرة المفتوحة التى تساوى فرق الجهد للمجال الكهربى عند الوصلة يمكن الحصول عليها فقط مع ارتفاع المدخلات ارتفاعاً استثنائياً، والتى يمكن الوصول إليها بضوء شمس غير مركز.

ب- نتيجة معالجة شبه الموصل بمادة فلزية doping<sup>(\*)</sup>، فإن ارتفاع الحائل أو المانع يكون دائماً أقل من فجوة الطاقة، وسترفع زيادة فجوة الطاقة من فولتية الدائرة المفتوحة، وإذا ما تخطى هذا الارتفاع مستوى الحد الأقصى لتولد ثنائيات الإلكترونات، الفتحات، سينخفض مقدار التيار المتولد، فهناك قيمة مثلى لفجوة الطاقة ط ف لآى توزيع طيفى معين،

---

(\*) doping : يقصد بها عملية إدخال شوائب معينة فى تركيب شبه الموصل بغرض الحصول على خواص بعينها (المترجم)

عنده يصل حاصل ضرب تيار القصر، وفولتية الدائرة المفتوحة إلى الحد الأقصى، وهذه القيمة المثلّية بالنسبة لضوء الشمس الواصل للأرض مباشرة هي - نظريًا - ١,٤ إلكترون فولت.

(٦) معامل شكل المنحنى: يعتمد شكل منحنى العلاقة بين الفولتية والتيار على خواص دايود الوصلة، ومن ثم فإن أقصى قدرة دائمًا ما تقل عن حاصل ضرب تيار القصر للدائرة في فولتية الدائرة المفتوحة، حتى مع غياب مقاومة موصلة على التوالي، وبزيادة فجوة الطاقة تتحسن نوعية الوصلة ومن ثم يقترب شكل المستطيل الواقع داخل منحنى العلاقة بين الفولتية والتيار في شكل (٦-٢) من المربع أكثر وأكثر.

(٧) الفواقد في مقاومات التوالي: يسبب فاقد القدرة في الخلية نتيجة مقاومات التوالي تفلطحًا أو تسطحًا في شكل منحنى علاقة الفولتية والتيار، ويمكن الهبوط بهذا الفاقد إلى حده الأدنى بتحسين الشكل الهندسي لشبكة التلامسات وتحسين تلامسات المقاومات، وبتقليل مقاومة الصفيحة في الطبقة السطحية، ويعبر عن تأثير نوعية الوصلة والمقاومات على التوالي على الأداء بمعامل الامتلاء Fill factor المعطى بالعلاقة:

معامل الامتلاء = القيمة القصوى لقدرة ÷ (تيار القصر للدائرة × فولتية الدائرة المفتوحة).

(٨) الفاقد نتيجة تغطية المعدن: ويساوى  $\frac{S_m}{S_e}$ ، حيث  $S_m$  هي مساحة السطح الأمامي غير المغطى بالمعدن،  $S_e$  هي المساحة الكلية، وهو محدد تمليه الاعتبارات التقنية ويحدده معامل التغطية  $(1 - \frac{S_m}{S_e})$ ، وكلما ارتفع معامل التغطية هذا قلت المقاومة على التوالي، والفاقد النمطي نتيجة عامل التغطية في الخلية الشمسية يتراوح ما بين ٥، ١٠%.

## الخواص المرغوبة فى أشباه الموصلات المستعملة فى الخلايا:

لقد أخذنا فى الاعتبار - حتى الآن - الآلية التى تحول بها الوصلة (الموجبة - السالبة)، طاقة الإشعاع إلى طاقة كهربية، وصغنا تعبيراً لكفاءة الجهاز الكهروضوئى بدلالة المتغيرات العيانية (الماكروسكوبية) المنظورة مثل كثافة تيار الإزلام، وشدة تيار قصر الدائرة، والفولتية لدى نقطة أقصى قدرة، ولكننا لا نستخلص من هذه الصيغ أية معلومات عن الخواص (الميكروسكوبية) المرغوب فيها لشبه الموصل الذى تصنع منه الخلية، وسنناقش فيما يلى هذه الخواص التى تثبت جدواها عند استعمالها فى الخلية الكهروضوئية.

## امتصاص الضوء:

لبعض أشباه الموصلات كفاءة عالية فى امتصاص الضوء، حيث تمتص حوالى ٩٠% من ضوء الشمس عبر سمك ١ ميكرون ( $10^{-4}$  سم)، ومن ناحية أخرى تقل قدرة بعض أنواع أشباه الموصلات الأخرى على امتصاص الضوء الشمسى، ويلزم أن يصل سمكها إلى ١٠٠ ميكرون (٠,٠١ سم) لتمتص نفس النسبة (٩٠%) منه، والفرق فى تصميم الجهاز والمتطلبات من المادة لهذين النوعين من أشباه الموصلات جد عظيم، ومن أمثلة أشباه الموصلات الكهروضوئية التى تتمتع بامتصاصية عالية، تيلوريد الكاديوم، وديسيلينيد إنديوم النحاس والسليكون غير المتبلور، فى حين يمثل السليكون المتبلر شبه موصل ضعيف الامتصاص، ويطلق على ممتصات الضوء القوية جداً اسم "أشباه الموصلات ذات فجوة نطاق مباشرة direct band gap conductors فى حين تسمى ماصات الضوء الرديئة مواد فجوة النطاق غير المباشرة indirect band gap materials وفى المواد التى لها فجوة نطاق غير مباشرة، يمكن لفوتون ذى طاقة مساوية لفجوة نطاق المادة، أن يحرر

إلكتروننا خارجيًا ويخلق زوجًا من (الإلكترون / فتحة)، وفي حالة أشباه الموصلات ذات فجوة النطاق المباشر فإن فوتونا وفونونا(\*) لهما طاقة ملائمة يمتصان كلاهما أنيا بواسطة نفس الإلكترون المقيد، وتنتج ثنائية إلكترون/ فتحة حرة.

### طول الامتصاص:

طول الامتصاص: هو متوسط المسافة التي يقطعها الضوء في مادة ما قبل امتصاص ٦٣% منه، ويحدد طول الامتصاص هذا مدى قدرة المادة على امتصاص الضوء، وهو بالمثل عامل جوهري يراعى عند تصميم الخلايا، إذ أنه يحدد - جزئيًا - مدى السمك الذي تصنع به الطبقات الماصة، ويبلغ طول الامتصاص للسليكون المتبلر حوالي ٣٠ ميكرونًا، ولأشباه الموصلات ذوات فجوات النطاق المباشرة كتيلوريد الكاديوم وديسيلينيد إنديوم النحاس يصل طول الامتصاص إلى ٠,٣ ميكرون.

### تأثير طاقة الفوتون:

للفوتونات ذات الطاقات المختلفة أطوال امتصاص مختلفة داخل نفس المادة، فالفوتونات ذات الطاقة الأعلى يزيد احتمال امتصاصها عن تلك ذات الطاقة الأقل حتى لو زادت هذه الطاقة الأقل عن طاقة فجوة النطاق، فعلى سبيل المثال لا يصل طول الامتصاص للفوتونات عالية الطاقة (أكبر من ٢,٥ إلكترون فولت) إلى ٠,١ ميكرون في حالة ديسيلينيد إنديوم النحاس ذي فجوة نطاق ١,٠ إلكترون فولت في حين أن حزمة من الفوتونات منخفضة الطاقة (١,١ إلكترون فولت) قد يلزمها ١ ميكرون لتصل لنفس المستوى من الإضعاف، وحتى مع السليكون المتبلر (وفجوة نطاقه ١,١ إلكترون فولت) تمتص الفوتونات ذات الطاقة ٢,٥ إلكترون فولت خلال

---

(\*) الفونون في الفيزياء هو شبه جسيم quasi - particle في مادة متبلورة يلعب دورًا مهمًا في توصيليتها الكهربائية والحرارية (المترجم)

٠,٥ ميكرون فى حين يلزم للفوتونات ذات ١,٢ إلكترون فولت ١٠٠ ميكرون لتمتص بنفس القدر، وهذا الاختلاف فى الامتصاص بين الفوتونات ذات الطاقات العالية والمنخفضة ينعكس على تصميم الخلية وعلى العوامل التى تحد من أدائها.

### تسليط المجال الكهربى:

يمثل طول الامتصاص العامل المحورى الذى يتحكم فى تصميم الجهاز الكهروضوئى، والدور الرئيسى لهذا الجهاز هو فصل الإلكترونات عن الفتحات بمجال يتكون. وفى واقع الأمر، فإن تسليط المجال الكهربى الملائم فيما يتعلق بامتصاص الضوء هو العامل الحاسم فى مدى فاعلية الجهاز الكهروضوئى، ولتحقيق هذا الهدف ينبغى أن يوضع المجال الكهربى فى وسط الحيز الذى تقع به أغلب عملية امتصاص الضوء الشمسى، وبتحقيق هذا الشرط سيتمص الكثير من أشعة الشمس، وتتولد حاملات طاقة حرة فى المكان الملائم على مقربة من المجال، بما يسمح بالاستفادة من هذه الحاملات الواقعة فى نطاق تأثير المجال الكهربى. غير أن ظاهرتى الانجراف drift والانتشار diffusion ينبغى مناقشتهما لشرح استعمال حاملات الطاقة الحرة المتولدة من الضوء النائى فى إنتاج الكهرباء.

### الانجراف drift:

يطلق على الإزاحة فى حاملات الطاقة الحرة والناجمة عن المجال (الانجراف drift). والمجال المتكون ذو قوة فصل هائلة بين الحاملات الحرة التى تحمل شحنات ذات إشارات مختلفة بمجرد وقوعها تحت تأثيره. ففى المواد التى لها فجوة نطاق مباشرة تمتص أغلب فوتونات الضوء الشمسى داخل نطاق المجال الكهربى أو النطاق القريب جدًا منها، لأن أغلب أطوال الامتصاص النمطية لهذه المواد (١ ميكرون) تساوى عرض المجال المتكون، وبالتوضع الملائم للمجال تتفصل - بالتقريب - كل حوامل الطاقة المتولدة من ضوء الشمس بصورة تلقائية

وتسهم فى التيار الكهربائى المنتج. والمجال الكهربائى المسلط بصورة ملائمة بالنسبة لشبه الموصل ذى فجوة نطاق مباشرة يفصل بسهولة فصلا كاملا تقريبا ما بين الإلكترونات والفتحات مما يشكل ميزة كبرى فى الخلايا الشمسية المصنعة من هذه المواد . أما فى أشباه الموصلات ذات فجوة النطاق غير المباشرة حيث طول الامتصاص ١٠ ميكرون، فإن جميع الضوء الممتص تقريبا يكون خارج تأثير المجال. وهنا تتسبب آلية أخرى فى فصل الشحنات هى الانتشار **diffusion**.

### الانتشار:

متوسط المسافة التى تستطيع القلة من حاملات الطاقة المتولدة من الضوء (الإلكترونات على الناحية الموجبة والفتحات فى الناحية السالبة) أن تقطعها فى مجال المكان المتكون قبل أن تعود أدراجها إلى حالات مقيدة **fixed** تسمى بطول الانتشار **diffusion length**. وكلما زاد طول الانتشارى لمادة ما ، زادت الفرصة فى تولد تيار أكبر. وفى المواد الكهروضوئية الحقيقية تتراوح الأطوال الانتشارية بين أقل من الميكرون فى معظم الطبقات الرقيقة إلى أكثر من ١٠٠ ميكرون فى بعض المواد ذات البلورة المفردة. ويلزم طول انتشارى جيد - بصفة مطلقة - لحسن أداء المواد ذات فجوة النطاق غير المباشرة كبلورات السيلكون. والعامل الحاسم الذى يحكم تجمع التيار بتأثير الانتشارية هو طول الانتشارى للمادة معبرا عنه كجزء من طول الامتصاص. وعلى ذلك فإذا كانت نسبة طول الانتشارى إلى طول الامتصاص أكبر من الواحد الصحيح فستفصل معظم حاملات الطاقة. والانتشارية محكومة، يحدها ميل الحاملات الحرة إلى الاندماج من جديد . وأبسط صورة لعودة الاندماج تحدث عندما يتفق أن يتلاقى حامل طاقة من الأقلية (أي إلكترون فى مادة من النوع الموجب) مع فتحة ويسقط فيها، وهو حدث نادر الوقوع فى واقع الحال نسبيا حتى فى وجود وفرة من الفتحات المتاحة. والمواد التى تسود فيها آلية عودة الاندماج هذه مواد فائقة ذات أطوال انتشارية بالغة الطول.

## مفرع أو مجزئ التيار Shunt:

لقد ناقشنا حتى الآن الأمور التي تؤثر على التيار الكهربى: عدد الإلكترونات والفتحات المتولدة عن الضوء، والتي تسهم فى سريان التيار من خلال الانجراف والانتشار... إلا أن مفهوم مراكز عودة الاندماج (وتسمى مراكز عودة الاندماج فى نطاق المجال بالمفرعات أو المجزئات) يؤدى بطبيعة الحال إلى مبحث مختلف، فالفاقد فى الفولتية قد يكون أخطر شأنًا من الفاقد فى التيار نتيجة عودة الاندماج. والفولتية فى الخلايا الكهروضوئية يتوقف مقدارها بصورة أساسيه على ارتفاع أبعاد المجال المتكون، بيد أن مراكز عودة الاندماج الواقعة داخل المجال يمكن أن تقلل - وبشدة - قوة المجال، وبالتالي تنخفض الفولتية بصورة ملموسة.

## المقاومة على التوالي:

هناك - لفقد الفولتية - آلية أخطر بكثير، هى المقاومة على التوالي. ويحصل هذا الفقد بسبب نفس الفاقد فى المقاومة الذى يواكب أية حركة للشحنات الحرة خلال الأسلاك. فأى سريان للتيار (أى الإلكترونات)، يولد نوعًا من الفاقد بالاحتكاك (هو ما نسميه بالمقاومة). والفاقد فى الفولتية يساوى مقدار التيار السارى مضروبًا فى المقاومة. ويزيد الفاقد فى الفولتية بزيادة شدة التيار أو بزيادة المقاومة.

وقد يرتفع الفاقد إلى مستوى ملموس نتيجة المقاومة فى الأجهزة الكهروضوئية فى طبقات شبه الموصل الداخلية من الخلية. وقد تصل مقاومة أشباه الموصلات ملايين أضعاف مقاومة المعادن. ويحدث الفاقد لأن حوامل الطاقة الحرة التى تتفصل بسبب المجال المتكون لا بد أن تستمر فى الانتقال مسافة ما لتصل إلى نقطة تلامس معدنية. وفى ظهر الخلية (حيث تغطى طبقة معدنية بالكامل كل السطح المتعرض) قد تكون هذه المسافة قليلة وفى الاتجاه الرأسى

بالكامل (لا تتجاوز الميكرون) في حين أن نقاط التلامس في السطح الأمامي عادة ما تأخذ شكل شبكة لتجنب التظليل (حجب أشعة الشمس). وللوصول إلى أصابع الشبكة يجب أن تتحرك حوامل الطاقة جانبا لمسافات طويلة تبلغ عدة ملايين من الأمتار، فتفقد مقداراً لا يستهان به من الطاقة في شكل مقاومة خلال هذه العملية، ويمكن التقليل من هذه المقاومة بتصنيع الطبقة العليا من شبه موصل ذي كثافة عالية من الحاملات الحرة.

### الكفاءة الكمومية Quantum efficiency:

الكفاءة الكمومية: هي واحدة من أكثر القياسات فائدة في أداء الخلية الشمسية. وهي مقياس لفاعلية الخلية في تحويل الضوء ذي الطاقات المختلفة، إلى كهرباء. ويمتص الضوء ذو الطاقات المختلفة على أعماق مختلفة من الخلية الكهروضوئية. والحاملات التي يولدها الضوء لها بطبيعتها فرص متباينة في الانفصال بسبب المجال الكهربى، اعتمادا على موضع بدايتها بالنسبة للمجال. وتقيس تقنية الكفاءة الكمومية النسبة من الحاملات التي تسهم في التيار الكهربى.

### منحنى العلاقة بين التيار والفولتية:

القدرة التي تنتجها الخلية هي حاصل ضرب التيار العامل والفولتية. وتحت ظروف القصر، يصل التيار لقيمه القصوى، إلا أن الفولتية تقرب من الصفر، ولا تنتج الدائرة أى قدرة تقريبا. وفي ظروف الدائرة المفتوحة تبلغ الفولتية أقصى قيمة ولا يمر تيار، فالقدرة الناتجة أيضا صفر. وفي مكان ما بين هاتين الحالتين الطرفيتين نحصل على ظروف أقصى قدرة، وهى التى يكون فيها كل من التيار والفولتية كبيرى المقدار (من ٧٠% إلى ٩٠% من قيمهما العظمى). وتصمم الخلايا والمصفوفات منها بحيث تنتج الكهرباء أقرب ما تكون من نقطة ظروف

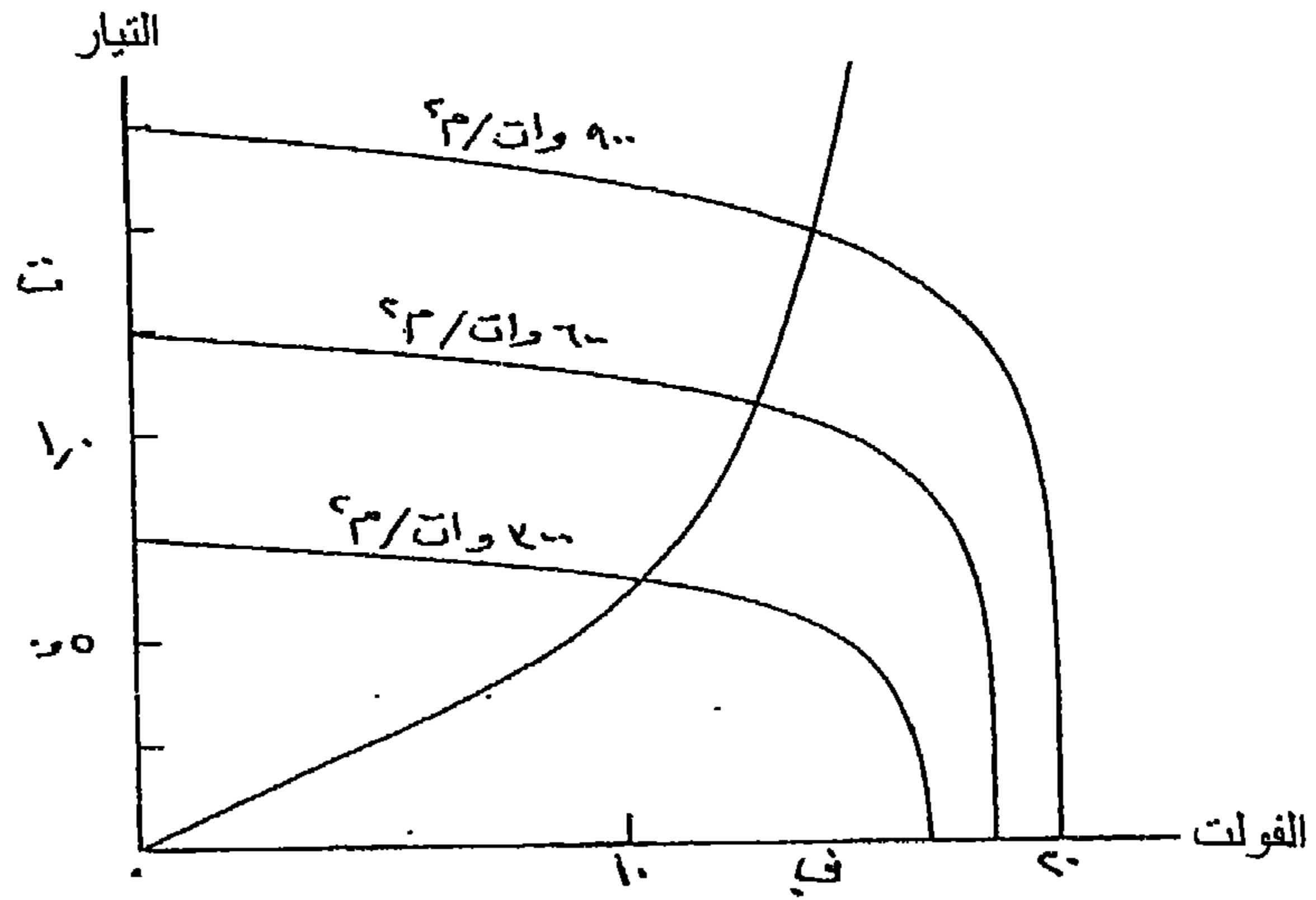


أقصى قدرة. ولا تصل أقصى قدرة مطلقا لحاصل ضرب فولتية الدائرة المفتوحة في تيار القصر، إلا أن درجة اقتراب القدرة القصوى من حاصل الضرب هذا هي ما يطلق عليها معامل الملء  $fill\ factor$ . فمعامل الامتلاء هو مقياس لمدى قرب الخلية من الأداء الأمثل. وقد يكون لبعض الخلايا فولتية دائرة مفتوحة عالية، وتيار قصر مرتفع، إلا أن معامل امتلائها ضعيف، والنتيجة هي قدرة منخفضة وكفاءة متدنية. ويعرف معامل الامتلاء بالنسبة ما بين القدرة القصوى، وحاصل ضرب تيار القصر في فولتية الدائرة المفتوحة. ويتخطى هذا المعامل بالنسبة للخلايا ذات الأداء الجيد ٧٠%.

### الطرز الكهروضوئية القياسية:

يتكون الطراز النموذجي (القياسي) الكهروضوئي من مجموعة من خلايا السليكون المتبلر الشمسية المتصلة ببعضها. والحجم النمطي على المستوى الصناعي يصل فيه قطر البلورة الدائرية إلى ١٠٠ مم ويصل طول ضلع المربع بالنسبة للخلايا شبه المتبلورة إلى ١٠ سم. وينتج كلاهما ١ وات من القدرة الكهربائية تحت الظروف الطبيعية لتعرضها للشمس. وفي مصفوفة نمطية يوصل ما بين ٣٤، ٣٦ خلية على التوالي. وتصل أقصى قدرة لمثل هذا التشكيل ما بين ٣٠، ٤٠ وات. ويبين شكل (٢ - ٨) علاقة التيار بالفولتية لطرز جهاز كهروضوئي نمطي ذي ثلاثة مستويات استضاءة في درجة حرارة الغرفة:

ويبين الشكل بالمثل خط منحنى القدرة الأمثل، حيث يولد الجهاز أقصى قدرة عند كل مستوى استضاءة. ولخلية سليكون مفردة فولتية دائرة مفتوحة قدرها نحو ٠,٥٥ إلى ٠,٦ فولت. وعلى ذلك تنتج مجموعة من الخلايا من ٣٤ إلى ٣٦ خلية، فولتية دائرة مفتوحة مقدارها ٢٠ إلى ٢١ فولتا. ولدى مستوى استضاءة كاف تعادل فولتية القدرة المثلى ٨٠ % تقريبا من فولتية الدائرة المفتوحة،



شكل (٢-٨)

علاقة التيار بالفولتية لطراز نمطي  
من الخلايا الكهروضوئية عند ٣٠٠ كلفن

ومن ثم فإن توصيل ٣٦ خلية على التوالي يفضي إلى فولتية قدرة مثلى قدرها ١٦ إلى ١٧ فولتا. وعند درجة حرارة ٦٠ م، وهي درجة نمطية في ظروف التشغيل الميدانية بالخلية ستهبط هذه الفولتية إلى نحو ١٤ أو ١٥ فولتا، وهي قيمة مثلى لشحن بطارية رصاصية حمضية شحنا جيدا تحت فرق جهد معتاد ١٢ فولتا، وهو ما يفسر اختيار عدد ٣٤ إلى ٣٦ خلية لتوصيلها على التوالي في الطراز النمطي، إذ تمثل البطارية الرصاصية الحمضية أوسع الوسائل انتشارا لتخزين الطاقة كهروضوئيا. وكما يظهر في شكل (٢-٨) تزداد فولتية الدائرة المفتوحة بشكل لوغاريتمي مع الفيض الشمسي. ولأغلب الخلايا يكون تيار القصر دالة خطية في درجة التعرض للشمس بحيث تعطى كفاءة تتزايد لوغاريتميا مع الاستضاءة حتى نقطة يتعاضد عندها الفاقد في مقاومات التوالي بما يقلص من هذه الكفاءة.

## تأثير درجة الحرارة:

تتناقص فولتية الدائرة المفتوحة  $V_{oc}$  بزيادة درجة حرارة مجموعة الخلايا، فتقل لكل خلية سليكونية مفردة بحوالي ٢,٣ مللي فولت لكل درجة. فإذا كانت  $\Delta T$  هي الفرق بين درجة حرارة التشغيل، والدرجة المرجع  $reference\ temp$ . فيمكن التعبير عن فولتية الدائرة المفتوحة والفولتية المناظرة للقدرة المثلى ( $V_{mp}$ ) للجهاز بالمعادلتين:

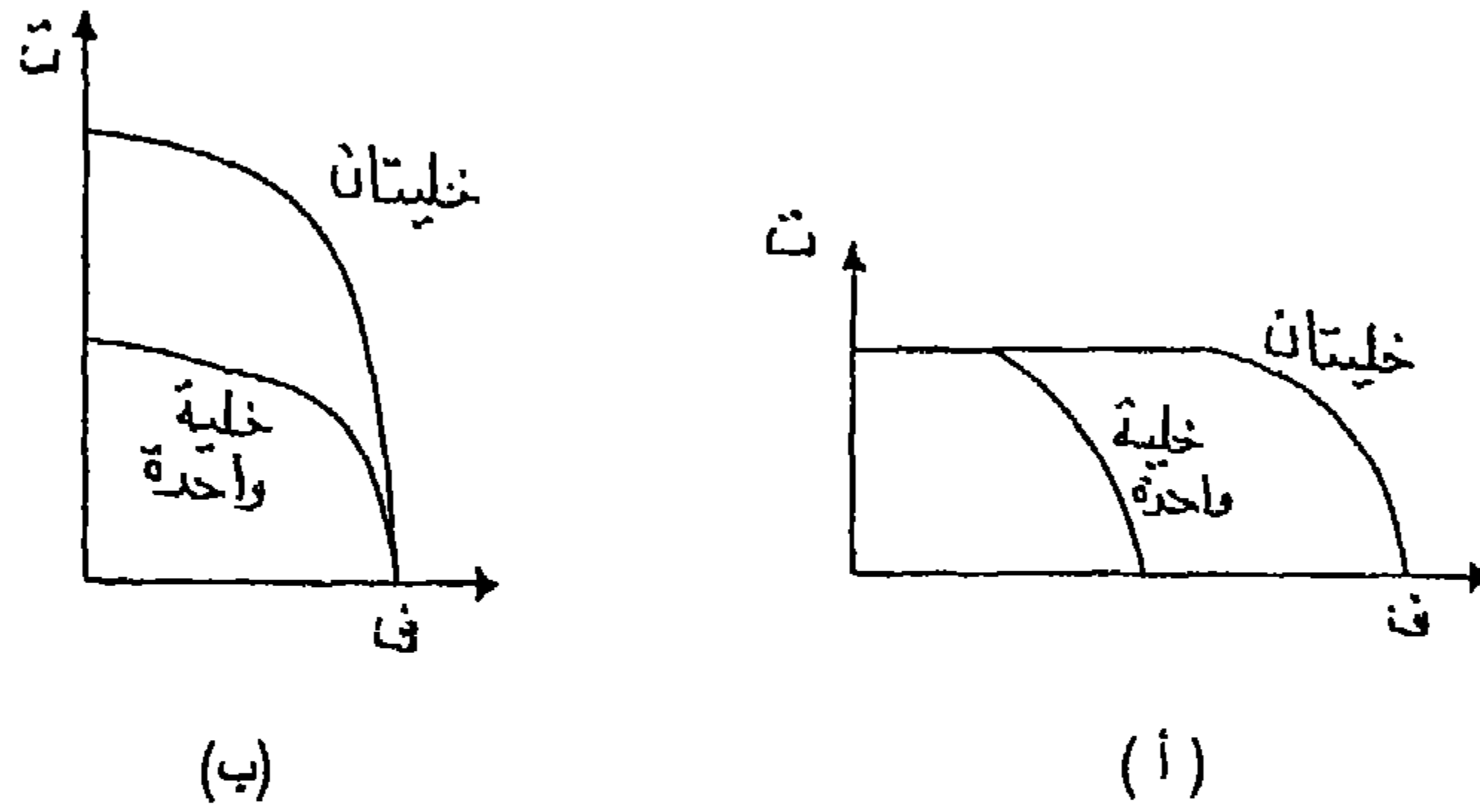
$V_{oc} = V_{oc}(28^\circ C) - \Delta T \times 2.3$  مللي فولت  
 $V_{mp} = V_{mp}(28^\circ C) - \Delta T \times 2.3$  مللي فولت  
وتحدد درجة حرارة الخلية تجريبياً اعتماداً على درجة التعرض للشمس، ودرجة الحرارة السائدة، وسرعة الرياح، وأسلوب التغليف. ويمكن تطبيق العلاقة التقريبية الآتية:

درجة حرارة الخلية = درجة الحرارة السائدة +  $K \times$  الإشعاع الشمسي الساقط  
مقدراً بالوات لكل متر مربع حيث  $K = 0.02$  إلى  $0.03$  درجة. م. ٢. وات<sup>-١</sup>.

## توصيل الخلايا الشمسية على التوالي وعلى التوازي:

يمكن الوصول إلى العلاقة بين التيار والفولتية للخلايا الموصلة على التوالي لكل تيار، بتجميع فروق الجهد للخلايا المنفردة. وعلى النقيض من ذلك تجمع قيم التيار المار في الخلايا الموصلة على التوازي لكل فولتية لرسم الدالة الشاملة بين التيار وفرق الجهد.

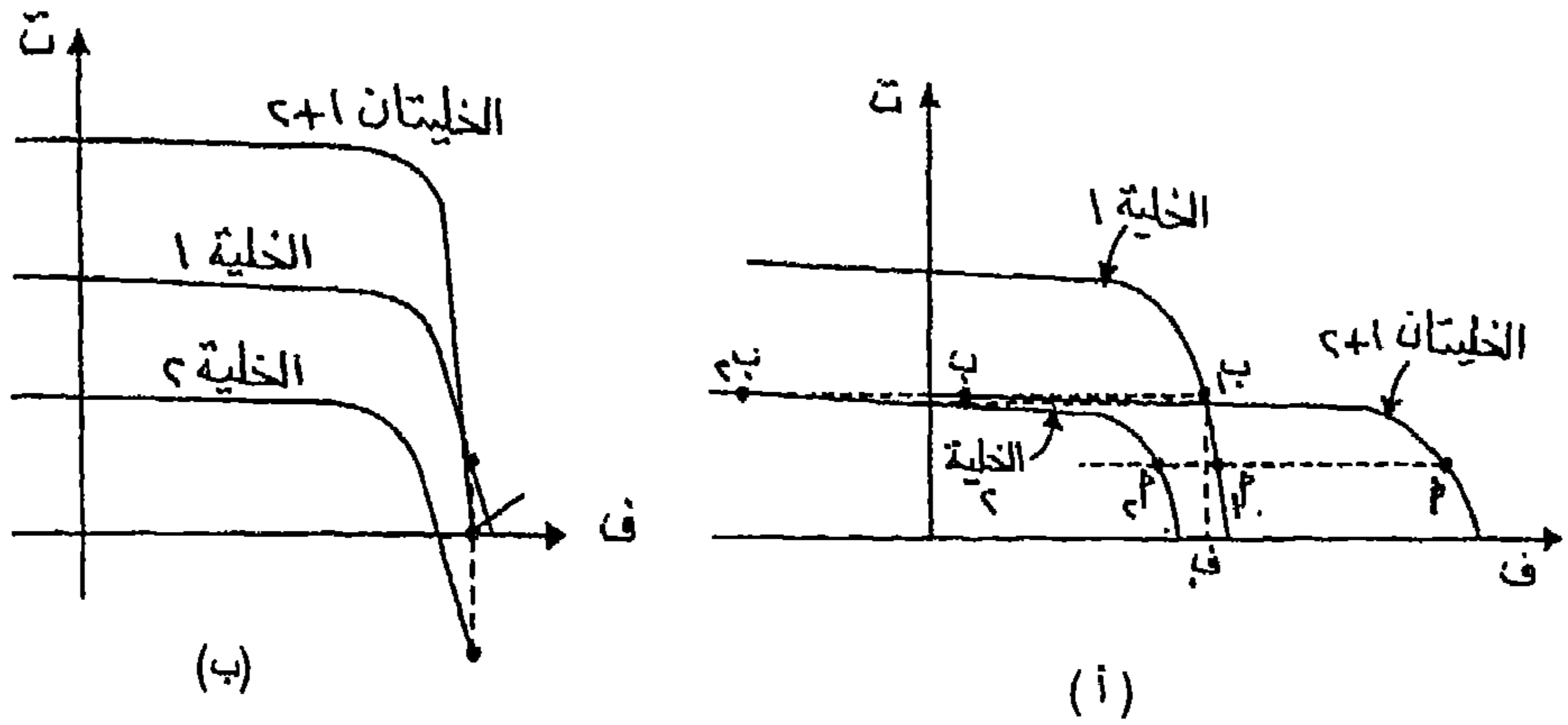
ويمثل شكل (٢-٩) حالتى توصيل خليتين متماثلتين على التوالي والتوازي بالترتيب، والقدرة القصوى المتولدة من الخليتين تساوى مجموع القدرتين المتولدتين بهما. وفي التوصيل على التوالي والتوازي تكون قيمة الفولتية المثلى والتيار الأمثل مماثلتين لمجموع القيم المثلى للفولتيات المنفردة والتيارات المنفردة على الترتيب.



شكل (٢-٩)

توصيل خليتين متماثلتين على التوالي (أ) وعلى التوازي (ب)

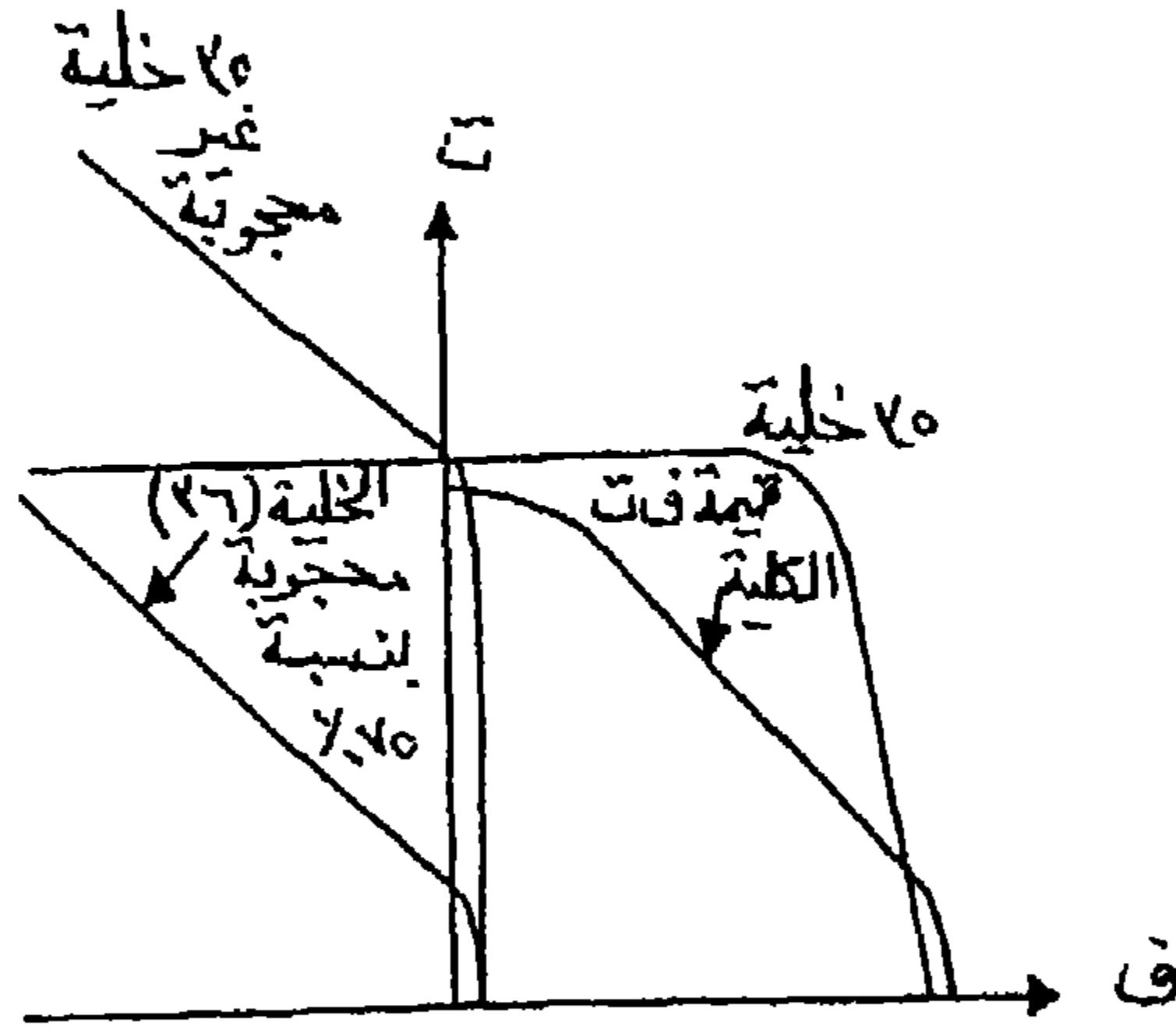
والموقف أكثر تعقيدا في حالة خليتين غير متماثلتين لهما تيارا قصرا مختلفان. واختلاف قيمة تيارى القصر قد يرجع إلى حجب الشمس عن إحدى الخليتين. ويمثل شكل (٢-١٠) المنحنى الإجمالى لعلاقة الفولت بالتيار عند توصيل خليتين على التوالي وعلى التوازي. وهناك نقطتان مبيتان على المنحنى الكلى فى حالة التوصيل على التوالي (أ، ب)، إلى جانب نقاط التشغيل المناظرة لكل خلية على حدة. ويبين الرسم بوضوح أنه لقيم  $F > F_c$  تصبح الخلية الأضعف التى تولد أقل تيار قصر، بمثابة حمل على الخلية الأقوى، مما ينجم عنه فاقد بسبب سوء التوافق بين الخلايا ويصبح فرق الجهد عبر هذه الخلية سالبا. والخلية الأضعف فى هذه الحالة هى التى تحدد قيمة التيار الكلى فى حين أن فولتية الدائرة المفتوحة الكلية لا تتأثر كثيرا بعدم التوافق هذا، وتعادل تقريبا القيم التى نحصل عليها من التوصيل على التوالي للخلايا المتماثلة. ومن الواضح بمكان أن القدرة الكلية المتولدة من خليتين غير متوافقتين تقل كثيرا عن مجموع القدرة التى تولدها خليتان منفردتان. وعلى ذلك لا يوصل على التوالي إلا الخلايا التى لها نفس تيار القصر. وعلى النقيض من ذلك لا يسبب التوصيل على التوازي أية مشكلة، حيث يبدو من شكل (٢-١٠ ب) أن القدرة الإجمالية تضاهى تقريبا مجموع القدرتين المنفردتين.



شكل (١٠-٢)

توصيل خلايا غير متماثلة على التوالي (أ) وعلى التوازي (ب)

ويعود السبب الرئيسى فى عدم التوافق بين الخلايا إلى وقوع بعضها - جزئيا - فى الظل، الأمر الذى يكثر حدوثه خلال تشغيل الجهاز. ولحسن الحظ فلدى الخلايا المستعملة عمليا تيارات تسرب أكثر مما يبينه شكل (١١-٢)، والتيار المتسرب، والذى يمثله فى نموذج خلية شمسية منظرية، مقاومة ضعيفة **shunt resistor** يقلل من كفاءة الخلية المفردة، غير أنه يجعل أداء المجموعة أقل حساسية إزاء عدم توافق الخلايا وتأثيرات الوقوع فى الظل. ويبين شكل (١١-٢) منحنى علاقة التيار بالفولت لوحدة مكونه من ٣٦ خلية موصلة على التوالي، منها ٣٥ خلية معرضة للشمس، وواحدة (رقم ٣٦) محجوبة عن الشمس بنسبة ٧٥%. ويمكن الحصول على منحنى علاقة التيار بالفولت الإجمالى بإضافة المنحنيات الخاصة بالخلايا المفردة حتى رقم (٣٥) للحصول على المنحنى المدون عليه (٣٥ خلية) بالشكل. ويتحقق هذا بإضافة الفولتيات المنفردة لكل قيمة تيار، ثم يضاف منحنى التيار - الفولت للخلية المحجوبة جزئيا، لنحصل على منحنى علاقة الفولت - التيار الإجمالى. وتيار القصر لهذه الخلية الأخيرة يبلغ ٢٥% فقط من تيار قصر الخلايا الـ ٣٥ المعرضة الأخرى.



شكل (١١-٢)

التوصيل على التوالي لـ ٣٦ خلية مع وجود تيار تسربى نمطى

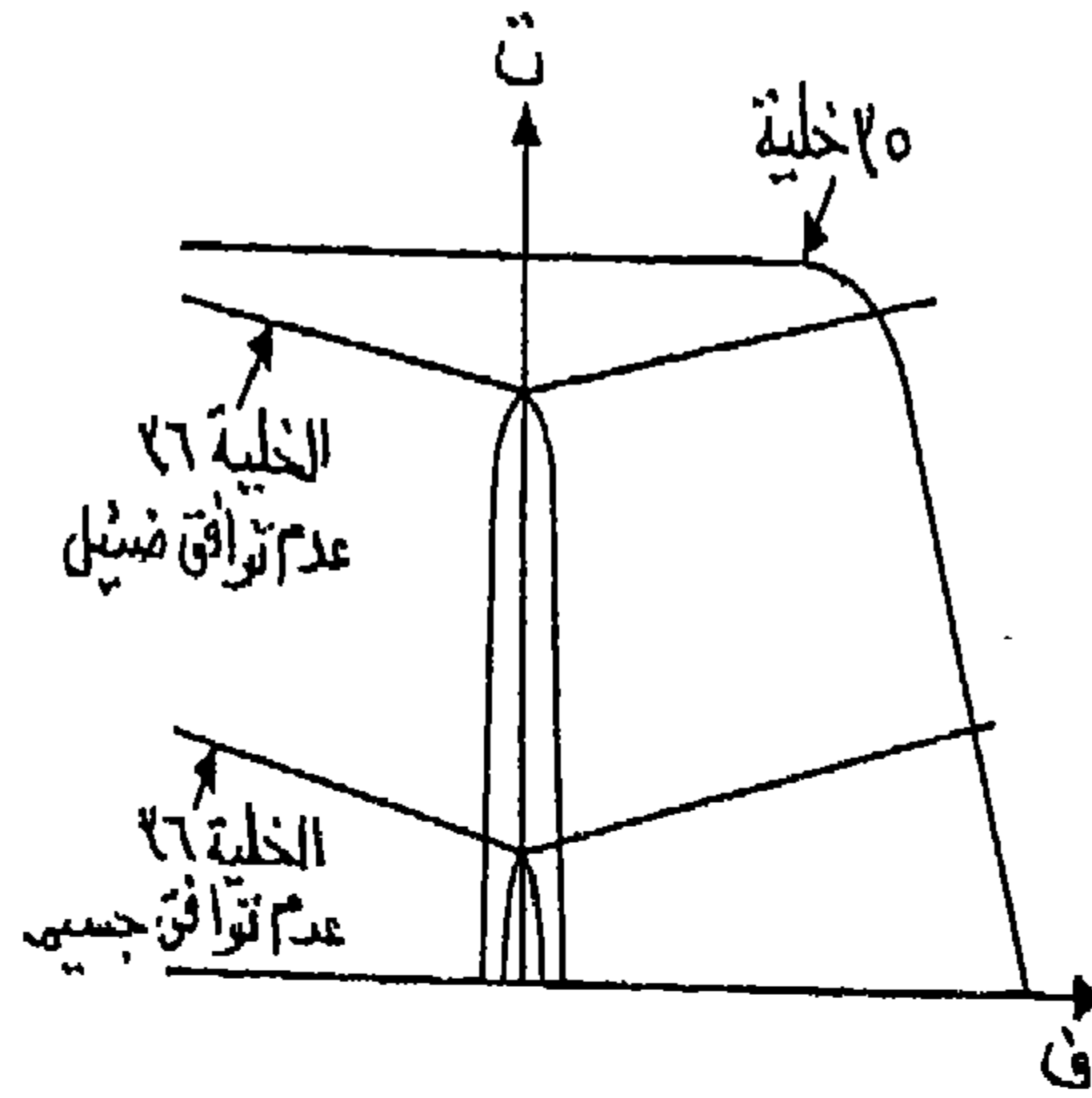
وقد افترض فى شكل (١١-٢) خلايا ذات تيارات متسربة وجدت فى وحدات صناعية نمطية. والتيارات المتسربة هذه تسبب انحدارا أو ميلا كبيرا فى المنحنى عند نقطة انعدام الفولتية (ف = ٠) لكل خلية مفردة. على أية حال حينما توصل الخلايا على التوالي فإن انحدار وصلة التوالي يقسم على عدد الخلايا. لذا فإن ميل منحنى علاقة الفولت و الأمبير فى حالة توصيل ٣٥ بطارية معرضة للشمس على التوالي (شكل ١١-٢) يقارب الصفر حول القيمة ف = ٠، فى حين أن ميلا أكبر يلاحظ فى منحنى العلاقة لخلية مفردة. وبوسعنا الآن الحصول على منحنى علاقة الفولت بالتيار الإجمالى بتجميع قيم فروق الجهد المتولدة فى البطاريات الخمس والثلاثين المعرضة للشمس - لكل قيمة للتيار - بالإضافة إلى الفرق المتولد فى البطارية الباقية (المحجوبة). ويبين الشكل بوضوح أنه نتيجة التسرب لم يعد التيار الذى تولده الوحدة تحده البطارية المحجوبة كما هو الحال لو

لم يكن هناك تسرب. ففي هذه الحالة الأخيرة، ستقسم كفاءة الوحدة - بسبب حجب الضوء - على معامل يساوى ٤ إذا كانت هناك خلية واحدة محجوبة بنسبة ٧٥%. وفي حالة التسرب التيارات النمطية يقل النقصان في كفاءة الخلية نتيجة حجب الضوء. وعلى ذلك فدائما ما تستعمل في الوحدات الصناعية خلايا بها بعض التسرب في التيار.

### تكون النقطة الساخنة:

لا يتسبب عدم التوافق بين الخلايا الموصلة على التوالي في فقدان ملموس في القدرة فقط، ولكنه يمكن أن يفضي إلى تلف خطير في الوحدة، ما لم تتخذ الاحتياطات اللازمة. فعدم التوافق يؤدي إلى عدم التحميل الأمثل للخلايا المختلفة. وفي بعض الأحيان تؤدي الخلية المولدة لأصغر تيار قصر، دور الحمل بالنسبة للخلايا الأخرى. وستتبدد بعض القدرة المتولدة بالخلايا عبر أضعف خلية، مما يفضي إلى ارتفاع في درجة الحرارة ويوجد نقطة ذات جهد حراري عال. وقد ترتفع درجة حرارة النقطة الموضعية هذه إلى الحد الذي قد يعرض غلاف الوحدة الخارجي لتلف حقيقى. وتحدث أسوأ الظروف في وحدة يمر بها تيار قصر، حيث يتعين أن تصرف كل القدرة المتولدة داخليا. فإذا احتوت الوحدة على ٣٥ خلية متماثلة بالإضافة إلى خلية واحدة أضعف منها والجميع متصل على التوالي، فلا بد وأن تفرغ كل القدرة المتولدة عن الخلايا ال ٣٥ النوية في الخلية الأضعف (رقم ٣٦)، لأنه ما من قدرة تنقل إلى الحمل الخارجى (ف للوحدة = ٠). وتعتمد كمية القدرة المنصرفة إلى هذه الخلية على مقدار عدم التوافق وعلى التيار المتسرب من الخلايا. ويصور شكل (٢-١٢) حالة خلايا ذات تيار متسرب صغير، ويمثل المنحنى العلوى علاقة التيار بالفولتية للخلايا الخمس والثلاثين المتماثلة، وقد أخذت في الاعتبار حالتان للخلية رقم (٣٦) تعتمدان على مدى عدم

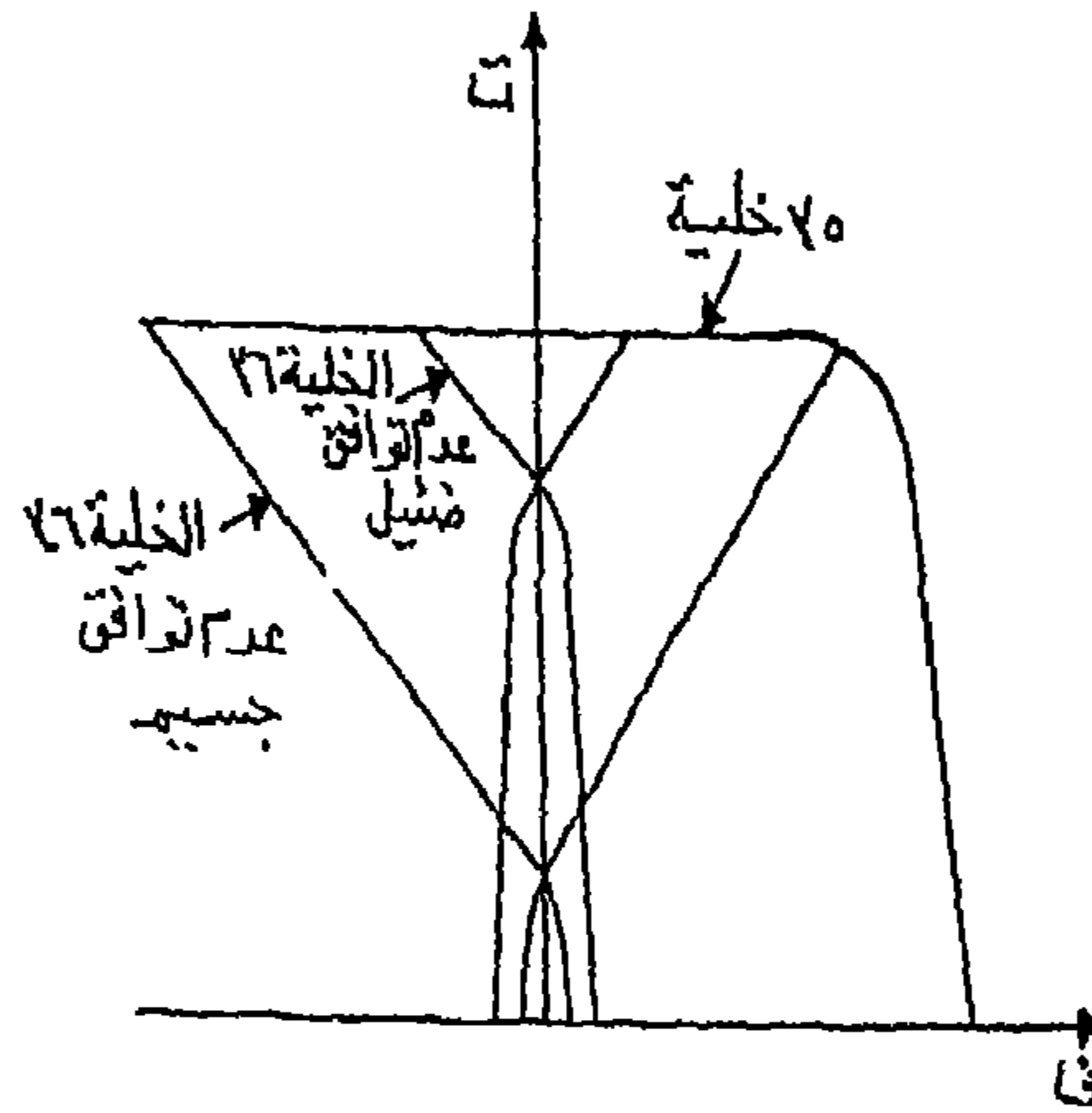
التوافق الناتج من الحجب الجزئى عن الشمس على سبيل المثال. وحيث إن ف للوحدة = . ، فبمقدورنا أن نحدد كمية القدرة المصروفة فى الخلية (٣٦) باعتبارها صورة بالمرآة لمنحنى علاقة التيار بالفولتية لهذه الخلية من خلال تقاطعه مع منحنى علاقة التيار بالفولتية للخلايا الخمس والثلاثين المتمثلة الموصلة على التوالي، وتتأظر القدرة المصروفة حاصل ضرب التيار فى الفولتية عند نقطة التقاطع. وكما يوضح شكل (١٢-٢) يحدث أكبر تفريغ للقدرة لدى قيمة عدم توافق صغيرة نوعا. وعلى النقيض من ذلك يحدث أعظم تصريف للقدرة مع قيمة أكبر من عدم التوافق (أكبر من ٨٠% فى مثالنا)، والذي يتقاطع عنده خط الحمل المناظر للخلية رقم (٣٦)، مع منحنى علاقة التيار بالفولتية للخلايا الخمس والثلاثين الموصلة على التوالي عند نقطة الحد الأقصى للقدرة (شكل ١٣-٢).



شكل (١٢-٢)

منحنى التيار - الفولتية الداخلى والقدرة المصروفة  
فى وحدة ذات تيار قصر لخلايا ذات تيار متسرب صغير





شكل (٢-١٣)

منحنى التيار - الفولتية الداخلى والقدرة المصرفة

فى وحدة ذات تيار قصر لخلايا ذات تيار متسرب ذى قيمة نمطية

وحيث إن وضع عدم التوافق الجسيم أقل احتمالا بكثير من عدم التوافق الضئيل، فإن مشكلة التجمع الحرارى وظهور نقطة ساخنة أقل إلحاحا فى الخلايا ذات تيار تسرب كبير.

ومن الأهمية بمكان - عمليا - تحديد الظروف التى تفرز حدوث مركز تجمع حرارى (نقطة ساخنة). وبحكم التعريف يناظر ذلك حالة تصل فيها الخلية إلى درجة حرارة مفرطة فى ارتفاعها (أعلى من ٨٥° م فى الظروف النمطية). وتتمثل المشكلة فى التوصل للشرط التى قد تؤدى لحدوث ذلك من حيث الفولتية والتيار الخارجيين ومستوى الاستضاءة.

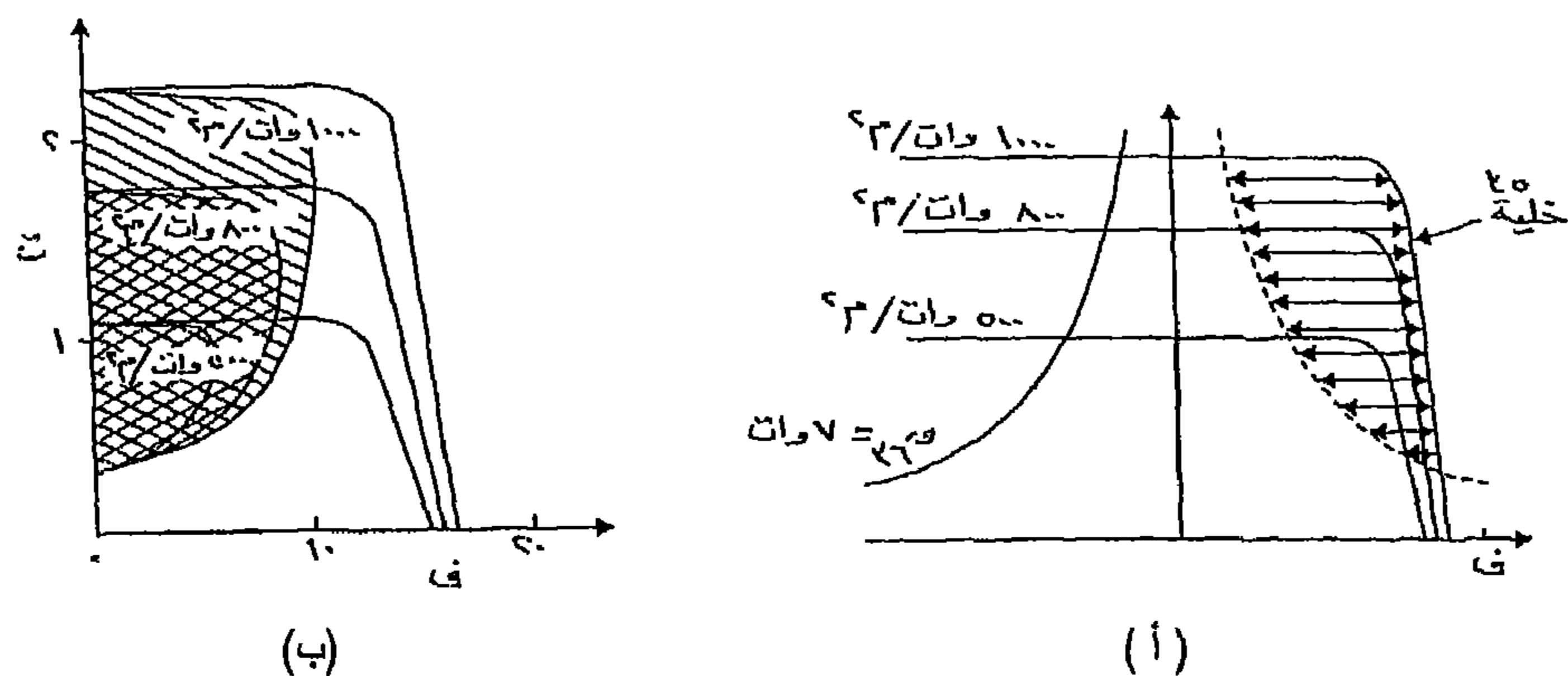
وفى ظروف التشغيل الاعتيادية دون حصول نقطة ساخنة تبلغ درجة حرارة الخلية ٦٥° م، كما تشير لذلك المعادلة، إذا افترضنا درجة حرارة سائدة قدرها ٤٠° م. وارتفاعا إضافيا فى درجة حرارة الخلية مقداره ٢٠° م بسبب تأثير عدم

التوافق من شأنه أن يولد نقطة ساخنة، حيث الوصول إلى درجة الحرارة القصوى المسموح بها وهي ٨٥° م. وبغرض رفع درجة حرارة الخلية فوق درجة الحرارة السائدة يلزم إجراء تفريغ إضافي منتظم للقدرة في الخلية. وتشير الحسابات النظرية والتجارب إلى وجوب تفريغ القدرة بما بين ٦،٨ وات لكل خلية من وحدة خلايا بقطر ٤ بوصات، بهدف رفع درجة الحرارة فوق الدرجة السائدة بعشرين° م. ويعتمد ذلك على نوعية التغليف (غطاء الوحدة) وعلى سرعة الرياح. وإذا اعتبرنا حالة وجوب تسريب ٧ وات، تحدد المعادلة (ق ٣٦ = ٧ وات) الشرط الحدي boundary condition لتكون النقطة الساخنة. وللتعرف على الظروف التي يتحقق في ظلها الشرط (ق ٣٦ = ٧ وات) يبين شكل (٢-١٤) منحنيات علاقة الفولت بالتيار للخلايا الخمس والثلاثين المتماثلة، من منحنى للتصريف المنتظم (ق ٣٦ = ٧ وات). دعنا في البداية نفحص الحالة عند الاستضاءة الكاملة للخلايا الخمس والثلاثين (١ كيلو وات / م<sup>٢</sup>). فلمعرفة ما إذا كانت ستكون نقطة ساخنة لكل قيمة للتيار عند فولتية الحمل سنأخذ في الحسبان صورة بالمرآة للمنحنى ق ٣٦ = ٧ وات ( $p_{36}=7w$ )، وهي المبينة بالشكل كخط متقطع غير متصل. وحيث إن فولتية الحمل هي مجموع الفولتيات الموجبة للخلايا الخمس والثلاثين، والفولتية السالبة للخلية رقم (٣٦)، فإن المحصلة تعطى بطول الخط المبين بالأسهم في الشكل (٢-١٤).

وبتكرار ذات الخطوات مع مستويات استضاءة متعددة، وتوقع النتائج على منحنى لعلاقة تيار الحمل مع فولتية الحمل، تحصل على شكل (٢-١٤ ب)، والذي يوضح أيضا منحنى التيار والفولتية الطبيعي للوحدة. ويحدد كل منحنى نطاقا معيناً للنقطة الساخنة مبينا على الناحية اليسرى، حيث يحتمل أن تتخطى درجة حرارة الخلية الحد الحرج. ومن الواضح أن احتمالية تكون نقطة ساخنة تتزايد بتزايد الاستضاءة وبنقصان الفولتية عبر الحمل. وعلى ذلك فمشكلة تكون

نقطة ساخنة أكثر إلحاحا مع التطبيقات بدون تخزين للبطارية حيث توصل وحدات البطاريات عبر أحمال متغيرة. فإذا استخدمت البطاريات فإن الوحدات (مجموعة البطاريات) تعمل بفولتية ثابتة قيمتها نمطيا ١٤ فولت، مما يجنبنا التشغيل في نطاق تكون النقاط الساخنة.

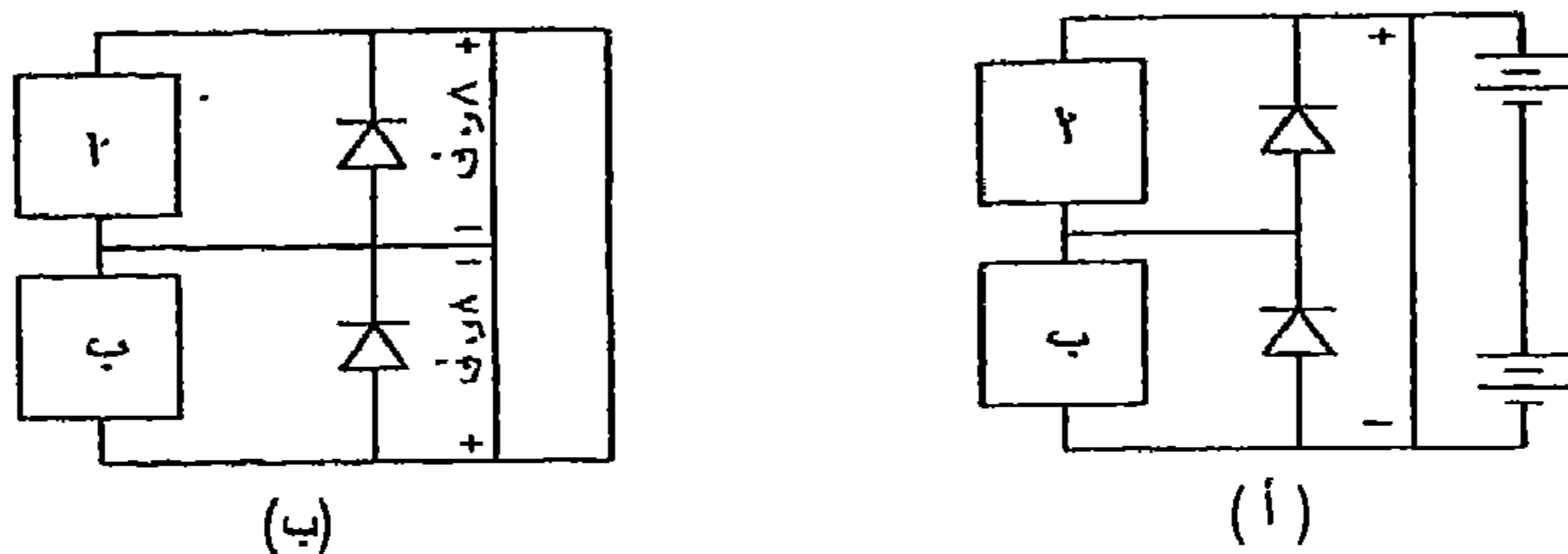
وترتفع احتمالية تكون النقطة الساخنة إذا زاد عدد الخلايا الموصلة على التوالي. ويبين شكل (٢-١٤) أن النقطة المثلى من حيث القدرة - مع التعرض الكامل للشمس - تقع على مقربة من نطاق النقطة الساخنة في حالة مجموعة من ٣٦ خلية موصلة على التوالي. وعلى ذلك، ولضمان التشغيل بعيدا عن تكون نقاط ساخنة يجعل بعض صانعي الوحدات نهاية طرفية ثالثة لها، بحيث تقسم الخلايا الست والثلاثون الموصلة على التوالي إلى خطين يحتوى كل منهما على ١٨ خلية كما في شكل (٢-١٥). وهنا يمكن أن يوضع دايودان مفرعان أو مجزآن على التوازي مع الخطين اللذين قسمت إليهما الوحدات (أ، ب).



شكل (٢-١٤)

(أ) تحديد منطقة التركيز الحرارى

(ب) منطقة تركيز حرارى نمطى لنموذج قياسى



شكل (٢-١٥)

دور الدايود المركب على التوازي في الحد من مشكلة تكون النقطة الساخنة

وإذا كانت مجموعة الخلايا تشحن حملاً ذا فولتية كبيرة كبراً كافياً. كبطارية مثلاً، فما من ميل لتكون نقاط ساخنة لأن مجموعتي الوحدات تكونان في حالة *forward biased* (\*). ولا يلعب الديودان دوراً، حيث إنهما ينحرفان بالورب في الاتجاه المعاكس. وعلى النقيض من ذلك إذا تم قصر دائرة الوحدات، فإن الفرع (ب) ذا الخلية الأضعف ينحرف في الاتجاه المعاكس على حين ينحرف الدايود المركب على التوازي بالورب في اتجاه الأمام بحيث يحد الفولتية عند حد ٨٠٠ مللي فولت.

وفي وضع قصر الدائرة يكون دور الدايودين المجزأين للتيار أن يقصرا الدائرتين في فرعي المجموعة. وبدون الدايودين يتعين أن تصرف أو تفرغ كل القدرة التي تولدها الخلايا الخمس والثلاثون المتمثلة إلى الخلية الأضعف، إذا ما قصرت دائرة أطراف المجموعة. وإذا استخدم الدايودان فينبغي أن تفرغ فقط قدرة الفرع من الوحدة التي من ضمنها الخلية الأضعف، في حين تفرغ القدرة المولدة من الفرع الآخر في أضعف خلية في هذا الفرع. وحيث إن نصف القدرة فقط هي التي تدفع إلى الخلية غير المتوافقة، فإن ارتفاع درجة الحرارة يكون محدوداً ويضعف احتمال تكون نقطة ساخنة.

(\*) هو وضع يسمح بسرّيان حر للشحنات الكهربائية نتيجة انخفاض المقاومة، بحيث يمكن لإلكترون أن يعبر الوصلة ويملاً فجوة قريبة منها (المترجم)

بناءً على المناقشة السابقة نستخلص أن توصيل الخلايا على التوالي أكثر حساسية من توصيلها على التوازي. ففي خط التوالي يتعين استعمال خلايا مماثلة لبعضها بقدر الإمكان لتجنب فواقد القدرة الناجمة عن عدم التوافق. وبوجه عام يقل وجود تيار متسرب من الخلية من عدم التوافق، وبالتالي من مشكلة تكون النقطة الساخنة. ويقل تأثير وجود الظل جزئياً (أو حتى بصورة كاملة) على كفاءة لوحة البيان. وتكون مشكلة النقطة الساخنة أقل خطورة في ظروف قصر التيار، لأن احتمال عدم التوافق الطفيف يرجح احتمال عدم التوافق الجسيم، وبالتالي فالتوفيق بين الخلايا أقل حساسية (مادام هناك تيار تسرب فإن ملامح الخلايا الموصلة على التوالي لا تحددها الخلية الأضعف).

### التطورات الحديثة في الخلايا الكهروضوئية (المواد الكهروضوئية)

غالباً ما يتحول الاختيار ما بين الكفاءة الأعلى، وتكلفة التصنيع الأقل، إلى اختيار ما بين المواد البلورية والشرائح الرقيقة منها. والأجهزة ذات البلورات أعلى كفاءة، على أن الأجهزة ذات الشرائح الرقيقة أقل تكلفة. وتجرى الكثير من البحوث على مواد التصنيع مع التركيز على السليكون البلوري والسليكون غير المتبلر، والشرائح الرقيقة متعددة البلورات والمواد من رتبة المجموعتين III-V ذات البلورة المفردة.

والسليكون المتبلر هو صاحب التاريخ الأطول والقاعدة التكنولوجية الأعرض، وما يزال هو المهيمن على السوق في صناعة وحدات توليد القدرة، وهو أكثر ما تمت دراسته من بين المواد الكهروضوئية، وتقنيات استخدامه في تطور وتقدم سريعين. وقد وصلت فنيات تصنيعه إلى مرحلة شبه أتماتيكية، إذ تم التوصل إلى تصنيع بلورات سليكونية عالية النقاء والجودة.

إن الابتكارات المتعددة في مجال البلورات السليكونية تثير الإعجاب، ففي حين كان تصنيع خلايا البلورات السليكونية يستلزم في الماضي ٣٠٠ إلى ٤٠٠ ميكرون من المادة الممتصة، فبالمقدور الآن تصنيع خلية عالية الكفاءة لا تزيد سماكتها عن ١٠٠ إلى ١٥٠ ميكرونًا. وما زالت أرقام الكفاءة للأجهزة المصنعة في ارتفاع مطرد سواء على مستوى البحوث العلمية أو التطبيقات الصناعية. وقد وصلت كفاءة الخلايا في نطاق البحوث إلى رقم ٢٢,٨% في ظروف الضوء الشمسي المعتادة. وهناك مزاعم بأن تحسينات لاحقة في المواد وفي التصميم سترفع الكفاءة إلى حدود ٣٠% تحت الظروف المعتادة لضوء الشمس، ٣٦% مع اتباع أساليب تركيزه، بيد أن هذه المزاعم تتكىء على اعتبارات مثالية لا تدخل في الحساب الفواقء التي يبدو ألا سبيل لتحاشيها في الخلايا عمليا، مثل إعادة اندماج (أوجر)<sup>(\*)</sup>، Auger أو اندماج بين نطاق ونطاق آخر<sup>(\*\*)</sup>، وبعض ظواهر إعادة الاندماج في المبتعث، والانخفاض في الفولائية نتيجة المقاومة الكهربائية. ومع وجود هذه الفواقء - على كل حال - يمكن أن تصل كفاءة الخلايا السليكونية ذات الوصلة المفردة في خاتمة المطاف ومع أسلوب تركيز الأشعة إلى ٣١%.

وليس رفع الكفاءة بالسبيل الوحيد الذي يتخذ مسار تطور البلورات السليكونية، فهناك مدخل آخر بالوصول لحل وسط يجمع بين الكفاءة وتخفيض تكلفة الإنتاج. والأسلوبان المتبعان لذلك هما تقنية الشريط ribbon technology، وفيها تنمى صفائح كاملة من السليكون والسليكون المصبوب، وتستعمل أساليب

---

(\*) Auger recombination : هو عودة اندماج بين الإلكترون والفجوة يصحبه إشعاع كهرومغناطيسي ويذهب فائض الطاقة وكمية الحركة إلى إلكترون أو فجوة أخرى . (المترجم)

(\*\*) Band to band recombination هو عودة اندماج يتحرك خلالها الإلكترون من نطاق التوصيل إلى داخل نطاق التكافؤ الخاوى المصاحب للفجوة (المترجم)

السكب البسيطة لتنمية كتل مربعة المقطع يتم نشرها بالمنشار إلى رقائق. ورغم أن كلا الطريقتين تؤدي إلى بلورات سليكونية متعددة ذات كفاءة أقل فإن هناك آفاقاً لزيادة إنتاجيتهما وخفض تكاليفهما، كما يمكن فيهما استخدام سليكون ذي نقاء أقل وتكاليف أقل، ونظراً لأن الخلايا متعددة البلورات ذات المقطع المستطيل يمكن صفها داخل المجموعة بشكل أكثر كثافة من حالة الخلايا الدائرية ذات البلورة المفردة، فإن المجموعات من الخلايا متعددة البلورات لها ذات الكفاءة تقريباً التي للمجموعات من الصفائح المسطحة من السليكون ذي البلورة المفردة.

ويستعمل المصممون لدى تصميمهم لأجهزة السليكون متعددة البلورات بعضاً من نفس التطورات المتقدمة المستحدثة مع السليكون ذي البلورة المفردة، كالانعكاس الداخلي والعاكسات السطحية الخلفية والطلاء بمواد مضادة للانعكاس - كما أفادت الأجهزة متعددة البلورات من إدخال الهيدروجين الذري في التقليل من عودة اندماج حاملات الطاقة التي تسببها عيوب المادة والحدود الفاصلة بين الحبيبات **grain boundaries**. وبفضل هذه التحسينات ارتفعت كفاءة الخلايا - على المستوى التجريبي إلى زهاء ١٧%.

والسليكون المهدرج غير المتبلر هو بديل رائد للسليكون أحادي البلورة أو متعدد البلورات، وقد وصلت كفاءة الخلايا ذات الوصلة الواحدة لحوالي ١٢%، وكفاءة الأجهزة متعددة الوصلات إلى نحو ١٣,٣%، كما تجاوزت كفاءة المجموعات الفرعية الكبيرة **Submodules** حد الـ ٩%.

ويتمتع السليكون غير المتبلر بامتصاصية عالية للضوء، ولا يزيد سمكه عن ١ إلى ٢ ميكرون كي يمتص ٩٩% من الضوء الساقط على فجوة نطاق قدرها ١,٧ إلكترون فولت، ويمكن ترسيب طبقات رقيقة من المادة غير المتبلرة على العديد من المواد غير المكلفة، كالصلب والزجاج والبلاستيكيات، على أن هناك عيبين أساسيين في السليكون غير المتبلر، أولهما أن أجهزة السليكون المهدرج غير

المتبلور تفقد كفاءتها عند بدء تعرضها لضوء الشمس، فقد فقدت الأجهزة المبكرة الصنع منها نحو ٥٠% من كفاءتها، ومنذ ذلك الحين توصل الباحثون إلى أن أحد أسباب ذلك هو الضوء الذي تجلبه العيوب في المادة والمعروفة بالروابط المتههلة(\*) *dangling bonds* في الطبقة الأصلية، لذا يصنع بعض المصنعين وحدات ذات طبقات أصلية متناهية الرقة، على حين يستعمل آخرون خليتين مصفوفتين من السليكون المهدرج لكل منهما طبقة أصلية غاية في الرقة، وقد نتج عن هذه التطويرات تقليل العيوب، بحيث لم تتخط ١٥% بالنسبة لمجموعة الخلايا، ١٠% بالنسبة للخلية المفردة.

والعيب الثانى هو تدنى الكفاءة، إلا أن تطوير أساليب التصنيع والتصميم والحد من عودة الاندماج في الطبقة الأصلية والتأثير المقاوم للموصل الشفاف للتيار، كفيلة بأن ترفع كفاءة الخلايا صغيرة المساحة إلى ١٥% وكفاءة فرع من مجموعة الخلايا إلى ما بين ١٠، ١٢%.

ومن الممكن الوصول إلى أرقام أعلى من الكفاءة باستعمال سبائك من السليكون غير المتبلور في الأجهزة ذات الوصلات المتعددة، ففي هذه الأجهزة تصف الخلايا المصنوعة من مواد مختلفة - ومن ثم ذات فجوات نطاق متباينة - تصف الواحدة فوق الأخرى في ترتيب تنازلى من حيث قيمة فجوة النطاق مع توليف كل خلية صوب قطاع مختلف من الطيف الشمسى، ومن شأن هذا التوزيع أن يزيد من فاعلية استغلال الضوء الشمسى، ومن ثم تحسين الكفاءة، وينبغى أن تصل كفاءة الخلايا ذات الوصلتين إلى ١٧%، وكفاءة الخلايا ذات الثلاث وصلات إلى حوالى ٢٤%.

---

(\*) نوع من الروابط يخلق عند ترسيب معدن داخل السليكون (المترجم)



وتوفر طبقات البلورات المتعددة الرقيقة مثل ثاني سيلينيد إنديوم النحاس (نح ندسل<sub>٢</sub> CuInSe<sub>2</sub>)، وتيلوريد الكاديوم (كد تيل CdTe) كل مزايا السليكون البللورى، فهي ذات امتصاصية عالية وتحتاج إلى كمية ضئيلة من المادة، كما أنها طيعة لعمليات التصنيع الأوتوماتيكي، ولا تعاني من تدنى الخواص الذى يجلبه تأثير الضوء، ويمكن تصنيعها بتقنيات الترسيب التى سيتم التوسع فيها مستقبلا.

ولقد ارتفعت كفاءة وحدات مجموعات خلايا تيلوريد الكاديوم الكبيرة إلى أكثر من ٧%، وكفاءة الخلايا ذات المساحة الصغيرة إلى ١١%، وتتخطى كفاءة وحدات ثاني سيلينيد إنديوم النحاس ١١%، كما تشير التقارير إلى تجاوز كفاءة خلاياها المصنعة حديثاً حد الـ ١٤%، ويبدو كما لو أن الوحدات ذات الوصلة المفردة ستصل عاجلاً لكسر حاجز الـ ١٥% فى كفاءتها، وقد نحصل على كفاءات أعلى باستعمال المواد من طائفة III-V<sup>(\*)</sup>، وأشهرها زرنيخ الجاليوم GaAs (جاز) وسبائكه مثل زرنيخ الجاليوم الألومنيومى AlGaAs (لو جاز) وزرنيخ الجاليوم الإنديومى InGaAs (ند جاز).

وزرنيخ الجاليوم مادة مثالية للكهروضوئيات، إذ أن لها فجوة نطاق نموذجية (١,٤٥ إلكترون فولت) للخلايا ذات الوصلة المفردة، كما تتمتع بامتصاصية عالية، ويمكن لزرنيخ الجاليوم أن يتسابق مع كثير من المواد المتنوعة لتغيير فجوة النطاق حسب الرغبة للحصول على تشكيلات لوصلات متعددة ذات كفاءة أعلى، ووردت تقارير بالوصول - باستعمال زرنيخ الجاليوم - إلى كفاءة ٢٢,٤% وقد نمت بالجهاز طبقة سطحية من بلورة مفردة من زرنيخ الجاليوم، مما زاد من إمكانية جمع أجهزة زرنيخ الجاليوم بين الكفاءة والتكلفة الزهيدة، وقد سجلت أرقام كفاءة خلايا زرنيخ الجاليوم ذات الوصلة المفردة تحت استضاءة شمسية مباشرة تبلغ

(\*) هى عناصر المجموعات ٣ ، ٥ فى الجدول الدورى للعناصر .

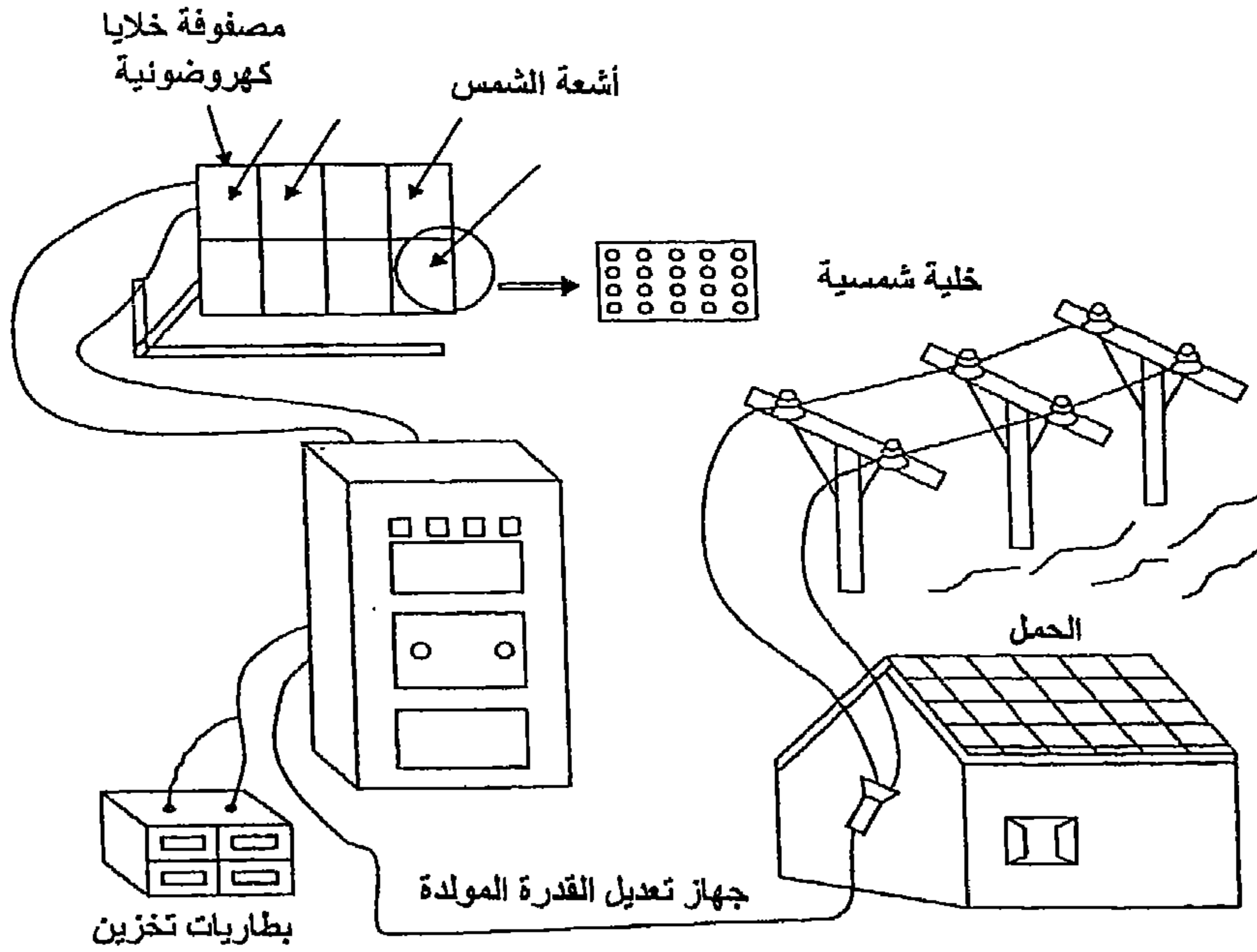
٢٤,٣%، وتحت الضوء الشمسي بعد تركيزه ٢٩,٢%، وكان الرقم القياسي على مستوى جميع الخلايا للكفاءة هو ٣١%، لخلية من زرنيخ الجاليوم/ السليكون ذات وصلتين تحت الضوء الشمسي بعد تركيزه، ويمكن استخدام السبائك من زرنيخ الجاليوم والسبائك الثلاثية القائمة على أساس المواد من طائفة III-V في كثير من التصميمات ذات الوصلات المتعددة التي يبشر بذلك مستقبلها، وفجوة نطاق زرنيخ الجاليوم نموذجية بالنسبة لخلية وسط في جهاز ثلاثي الوصلات، وأفضل قرين له هو سبائك زرنيخ الجاليوم مثل زرنيخ الجاليوم الألومنيومي (لفجوات النطاق العالية)، وزرنيخ الجاليوم الإنديومي لفجوات النطاق المنخفضة، ومن شأن هذا المزيج أن يتوافق جيدًا مع أبعاد التشبيكة الذرية(\*) وأن يتيح التصنيع من قطعة واحدة، كما سيعزز من احتمال الوصول إلى كفاءات في نطاق من ٣٥ إلى ٤٠%.

### محطات القوى الكهروضوئية الشمسية SPV:

يمكن أن تدمج الطاقة الشمسية الكهروضوئية في الشبكة العمومية، كما يمكن أن تستغل في وحدات مستقلة بذاتها، والمزج ما بين الوحدات المستقلة والربط بالشبكة العمومية يبعث مفهوم تركيب وحدات استغلال الطاقة الشمسية الكهروضوئية أعلى الوحدات السكنية، بحيث تلبي أحمال الذروة في خلال فترات سطوع الشمس (شكل ٢ - ١٦) وتصمم مثل هذه المنظومات على وجه العموم لإنتاج ما يكفي من الكهرباء لتغطية احتياجات المساكن بالكامل على مدار العام، وعلى أية حال، فلا يلزم بالضرورة أن تلبي المنظومات المركبة فوق المساكن الاحتياجات للطاقة في كافة الفترات الزمنية.

---

(\*) يقصد بالتشبيكة الذرية Lattice الكيفية التي تترتب بها الذرات داخل المادة المتبلرة (المترجم)



شكل (٢-١٦)

#### رسم تخطيطي لمحطة توليد قوى شمسية كهروضوئية

ومحطات القوى المركزية ذات السعة المتوسطة (من ١٠٠ كيلو وات إلى ١ ميجاوات)، والأكبر منها تصمم عادة بنفس كيفية محطات القوى التقليدية، ويحول التيار الكهربى المستمر المولد من مجموعة المحطات الشمسية الكهروضوئية فى البداية إلى تيار متردد من خلال مقومات عكسية invertors بحيث يتزامن مع تردد الشبكة العمومية قبل تغذيته فيها، ولا يكون هناك عادة أجهزة تخزين منفصلة فى حالات التوفيق مع الشبكة.

ومن ناحية أخرى، يتلاءم استخدام الوحدات الكهروضوئية الشمسية المستقلة بذاتها، مع نوعية أحمال بعينها طبقا للتصميم، وقد تكون هذه المنظومات ذات تيار مستمر أو تيار متردد وفقا للاحتياج، فإذا كانت الحاجة للأحمال الموصفة خلال

ساعات عدم سطوع الشمس، فيلزم إدخال أجهزة لتخزين الطاقة في المنظومة، وتولد مجموعة المحطات الشمسية الكهروضوئية الطاقة في خلال ساعات سطوع الشمس، وتخزن في أجهزة التخزين لحين الحاجة إليها خلال ساعات احتجاب الشمس، وغالبًا ما يتكون جهاز تخزين الطاقة من بطاريات (حاشدات) كهروكيميائية، وتلبى الأحمال في أثناء سطوع الشمس رأسًا من مجموعة المحطات الشمسية الكهروضوئية، دون أن يكون للبطاريات دور فعال في تلبية هذه الأحمال.

### توليد القوى الكهروضوئية: الآفاق المستقبلية والضوابط:

توجد آفاق مستقبلية لاستغلال القوى الكهروضوئية وحلولها محل طرق توليد القوى التقليدية على مستوى العالم ككل، كمصدر أولى للكهرباء، نظرًا لما هو متوقع من تخفيض تكلفتها بحيث تغدو منافسة لبدايل القدرة الأخرى في التطبيقات من نوعية أحمال الذروة، وبوسع الطاقة الشمسية بسهولة أن تغزو هذا المجال، على أن هناك عددًا من المسائل المهمة بما فيها التكلفة، ومساحة الأرض المطلوبة، والتوفيق مع الشبكة العمومية، والطبيعة المتقطعة لمصدر الطاقة الشمسية، وكيفية التخزين، مما يؤثر على سرعة اختراق الطاقة الشمسية الكهروضوئية للسوق وانتشارها، وتعد هذه المسائل جد جوهريّة عند تقييم آفاق استغلال هذه الطاقة في توليد القدرة اللازمة للأحمال الوسطية والأحمال الأساسية لمرافق الاستهلاك المركزية، وهناك مناطق في العالم ستسهم فيها منظومات القدرة الشمسية الكهروضوئية الموصلة بالشبكات العمومية بنصيب وافر، ولكي تكون مجدية اقتصاديًا يتعين أن تكون تكلفة هذه الطاقة قادرة على منافسة القدرة المولدة من خلال المصادر الأخرى.

### التكلفة:

خفضت البحوث والتطوير من تكلفة إنتاج الطاقة الكهروضوئية لتهبط إلى ٠,٣ دولار أمريكي لكل كيلووات ساعة بدون تخزين، وهو ما يمثل ١/٤٠ من التكلفة سابقاً، ومن شأن هذه التكلفة أن تقلص من خلال العمل البحثي المكثف ونشاطات التطوير، وتقع هذه التكلفة في نطاق الأسعار السائدة التي تؤدي حالياً لقاء القدرة في فترات الذروة إبان أيام الصيف بالغة القيظ، وعلاوة على ذلك تقدم القدرة الكهروضوئية منافع بيئية للمجتمع، لا تظهر أهميتها في التحليل الاقتصادي التقليدي، ولدى إدراج هذه العوامل البيئية عند التحليل الاقتصادي تصبح أسعار السوق الحالية لاستغلال الطاقة الكهروضوئية - من حيث استعمالها في المرافق - قادرة على منافسة الكهرباء المولدة بالطرق التقليدية.

### الحيز اللازم:

يلزم لمحطات القوى الكهروضوئية حيز كبير المساحة من الأراضي لتركيب مصفوفات الوحدات الشمسية، وتشير التقديرات المبكرة إلى أن محطات القوى الكهروضوئية يلزمها من خمسة أضعاف إلى عشرة أضعاف مساحة الأرض اللازمة لمحطة قوى تعمل بإحراق الفحم أو محطة قوى نووية، إلا أن تحليلاً أحدث يبين أن احتياج المحطات الكهروضوئية من الأراضي يمكن مقارنته باحتياج التكنولوجيات التقليدية إذا اعتبرنا تكاليف نقل المواد المعدنية والتخلص من النفايات، وقد قيم احتياج توليد القوى الكهروضوئية بمقدار ٠,٠٨ إيكرا (\*) لكل جيجاوات. ساعة، في حين يبلغ الاحتياج ٠,٠٩ إيكرا لكل جيجاوات ساعة في حالة الفحم، ٠,٠٨٣ إيكرا / جيجاوات ساعة في حالة المحطة النووية.

---

(\*) الإيكرا acre وحدة مساحة تعادل ٤٨٤٠ ياردة مربعة أي حوالى ٤٠٤٣ م<sup>٢</sup> (المترجم)

## الدمج مع الشبكة العمومية:

تُشترك مراكز توليد القوى الكهروضوئية الكبيرة مع منظومات شبكات توزيع القوى المتناثرة، في نطاقين من المشاكل فيما يختص بدمجها فيما بينها، وعلاقتها بشبكة المرافق العمومية، والمشكلة الأولى وثيقة الصلة بالتقنية، في حين ترتبط المشكلة الثانية بطبيعة الطاقة الشمسية المتقطعة.

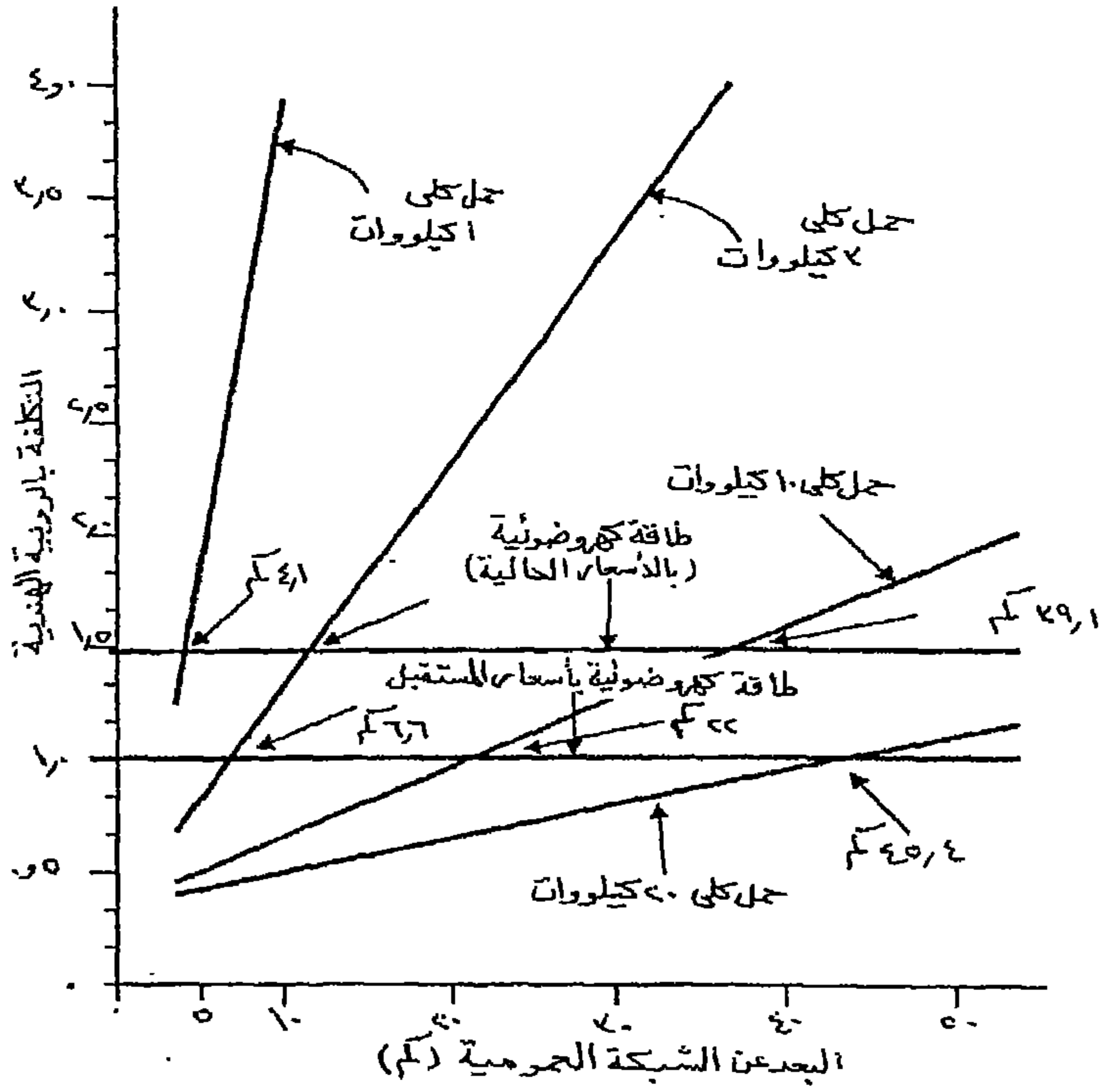
## التخزين:

بعيدًا عن مشكلة تكلفة وحدات إنتاج الطاقة الكهروضوئية، فالعائق الأساسي أمام انتشار هذه الطاقة لتغطية الأحمال الأساسية هو الافتقار إلى نظام زهيد لتخزين الطاقة الكهربائية المولدة خلال فترات سطوع الشمس، وذلك مع الإقرار بتحقيق منافع من حيث الأمان والبيئة يوفرها استغلال الطاقة الشمسية في تلبية الأحمال الأساسية. وعلى ذلك تكثف البحوث والتطوير جهودها بهدف التوصل إلى تقنية تخزين توافق الطاقة الكهروضوئية سواء على المدى الطويل أو القصير، ويلوح أن أقرب البدائل المباشرة لذلك على مستوى الاستخدام في الشبكات العمومية هو التخزين في البطاريات الرصاصية الحمضية، أو الضخ الهيدروليكي أو الهواء المضغوط، ويرجح مستقبلا أن تتطور وسائل التخزين باستخدام وسائل خلايا الوقود، وإنتاج الهيدروجين بالتحليل الكهربائي، ومغناطيسيات الموصلات فائقة التوصيل.

## اقتصاديات الطاقة الشمسية الكهروضوئية:

أجريت في الهند دراسات عدة حول التقييم الاقتصادي لمنظومات القدرة الشمسية الكهروضوئية، رغم أن هذه الاقتصاديات تتكئ - بنسبة كبيرة - على طبيعة الاستهلاك والموضع الذي تقام فيه هذه المنظومات ومدى توفر الطاقة

التقليدية، وتظهر قدرة منظومات الطاقة الكهروضوئية على المنافسة - سعريًا - لدى المناطق التى يتراوح بعدها عن شبكة خطوط نقل القدرة ما بين ٤، ١٢ كم، إذا تراوح حجم الحمل المطلوب بين ١، ٣ كيلو وات حتى مع التكاليف الرأسمالية الراهنة لإنشاء الوحدات الكهروضوئية (شكل ٢ - ١٧). وللقرى التى تبعد عن الخطوط بعشرة كيلو مترات وتصل أحمالها إلى ١٠ كيلو وات (شاملة استهلاكات إنارة الشوارع والزراعة والصناعة) تكون تكاليف الطاقة الكهروضوئية أعلى - نسبيًا - من تكاليف مد الشبكة العمومية، إلا أنه - وحتى عند هذا المستوى من الحمل - إذا بعدت القرية عن الشبكة بمسافة ٤٠ كيلومترًا أو أكثر، تصير المنظومات الكهروضوئية الأفضل اقتصاديًا، وحيث إن الطاقة الشمسية الكهروضوئية تقدم تقنية ملائمة للمناطق النائية والأقاليم التى تعاني من شح القوى المحركة، فتزودها بالكهرباء وبخدمات اجتماعية متعددة كالصحة والتعليم فى فترة وجيزة للغاية، فإن هناك مبررًا اقتصاديًا قويا للاستثمار فى تشييد منظومات الطاقة الكهروضوئية فى المناطق الوعرة، والأقاليم الصحراوية وغيرها من الرباع التى يتعذر الوصول إليها، وكذلك القرى التى لم تصلها الكهرباء بالسهول التى تبعد عن الشبكة العمومية بنحو ثمانية كيلو مترات، فهناك مساحات شاسعة من الأراضى تكتنفها مثل هذه الظروف، وعلى ذلك فمن المبرر اقتصاديًا أن توجه الاستثمارات القومية فى إنتاج القدرة الكهروضوئية على المقياس الكبير إلى تلك المناطق، فذلك أجدى من اللجوء لمصادر الطاقة التقليدية.



شكل (٢-١٧)

مقارنة بين مستوى التكلفة الحالي لمنظومات الطاقة الكهروضوئية

وتكاليف مد الشبكة العمومية لإنارة الشوارع لدى الظروف المختلفة من الحمل والمسافة

والطاقة الكهروضوئية ميزة كبرى، وهى القصر المتناهى فى الفترة اللازمة للبدء فى إنتاجها، إذ يمكن إمداد أنأى المواقع بالكهرباء فى غضون مدة وجيزة، وكمثال، تم بالفعل إنارة ما يربو على ٤٣٠٠ قرية للهند - لم تكن الكهرباء قد دخلتها - بالطاقة الكهروضوئية الشمسية، بما غير بالفعل حيواتها، ولم يكن ميسوراً - وعلى مدى ٥ إلى ٢٠ سنة - توصيل الكهرباء لهذه القرى من المصادر التقليدية نظراً لموقعها النائى وصعوبة الوصول إليها، وبالإمكان إقامة محطة قوى بسعة ١٠ ميجاوات فى أقل من عام، فى مقارنة صارخة مع محطات القوى التقليدية وعلى وجه الخصوص المحطات النووية.



وعلاوة على ذلك فالمنظومات الكهروضوئية عدد من المزايا بالإضافة إلى كونها مصدرًا نظيفًا ومتجددًا، فليس بهذه المنظومات أجزاء متحركة، وهو ما يجعل تكاليف صيانة محطات القوى الشمسية - من الناحية العملية - فى حكم المنعدمة، وهى ظاهرة تجلت فى تشغيل منارات المناطق النائية ومحطات الاتصال بالمرحلات Relay وفى مركبات الفضاء، ومنظومة الطاقة الشمسية تتكون من عدد من وحدات الخلايا الشمسية، بما يتيح نطاقًا عريضًا من التطبيقات بأنواعها وسعاتها المتفاوتة وبنفس التقنية ودرجة الكفاءة فى تحويل الطاقة، ويمكن إنتاج الخلايا الشمسية بأعداد كبيرة - شأنها شأن الدوائر المتكاملة فى أجهزة الترانزستور وأشباه الموصلات، ويبشر ذلك بإمكانية حدوث خفض كبير فى التكلفة، اعتمادًا على اقتصاديات الحجم<sup>(\*)</sup>، مع اتساع حجم السوق، ومن المتوقع أن يؤدى التطور فى تكنولوجيا تصنيع الخلايا، وتكنولوجيا الرقائق الدقيقة المستحدثة إلى مضاعفة الانخفاض فى تكاليف إنتاج الطاقة الشمسية الكهروضوئية.

### تطبيقات الطاقة الكهروضوئية:

لقد استعملت الطاقة الكهروضوئية فى تطبيقات غير مألوفة، لتوليد الكهرباء للأقمار الصناعية فى الفضاء، بيد أن القيمة الحقيقية للطاقة الكهروضوئية تكمن فى احتمالاتها المستقبلية لإنتاج الطاقة على الأرض، وبتكاليف منخفضة تؤهلها لمنافسة المصادر التقليدية للكهرباء كالطاقة النووية والفحم والنفط والغاز الطبيعى.

ورغم أن الطاقة الكهروضوئية ما زالت حتى وقتنا الراهن أغلى من أن تتنافس الكهرباء التقليدية بشكل مباشر، فإن جهود الباحثين تسير بها حثيثًا نحو تحقيق هذا الهدف، وحينما تصل الطاقة الكهروضوئية إلى المستوى المأمول من

---

(\*) يشير المؤلف إلى ما هو متعارف عليه اقتصاديًا من انخفاض نفقات تكاليف إنتاج الوحدة من منتج ما بزيادة عدد الوحدات المنتجة منه (المترجم)

التطور، فإنها ستكون جديرة بإنتاج قسم لا يستهان به من الكهرباء، بما يسمح بتقليل الأعباء البيئية، وتستخدم الطاقة الكهرومائية حاليًا في مجموعة متنوعة من التطبيقات سنناقش فيما يلي بعضًا منها.

### ضخ المياه:

يمثل استعمال الطاقة الكهروضوئية لضخ المياه بالمناطق المنعزلة، تطبيقًا له أهميته من بين تطبيقاتها، فالطاقة الكهروضوئية ذات تنافسية مع كل الأساليب التقليدية لضخ المياه في المواقع النائية حتى مع مستوى التكلفة الحالية، وتصلح الطاقة الكهروضوئية بصفة استثنائية لأغراض الري، حيث تلزم كميات أكبر من المياه عادة مع ازدياد سطوع الشمس.

وتتراوح قدرة المنظومات الكهروضوئية لضخ المياه ما بين بضعة مئات من الواطات إلى بضعة كيلو واطات، والاستعمال الكلاسيكي للطاقة الكهرومائية لضخ المياه سائد في مجتمعات العالم الثالث، حيث تستخدم كبديل للقوة العضلية للبشر أو الماشية، والحجم النمطي للمنظومة هو ٠,٤ كيلو واط، وتتكون من مصفوفة وحدات كهروضوئية مركبة على هيكل متين، ووصلات سلكية ومفتاح تشغيل ومحرك يغذى مضخة بالتيار المستمر، وبإمكان مثل هذه المنظومة أن ترفع ٢٠٠٠٠ لتر من المياه من عمق ٧ - ٨ أمتار، ولقد وجدت الحكومة الهندية أن الوحدات الكهروضوئية تفضل استعمال الديزل كقوة محرك، فالوحدات الكهروضوئية لا تحتاج إعادة إمداد بالوقود، كما لا تحتاج إلا القليل من الرقابة في أثناء التشغيل والصيانة، وللصيانة البسيطة غير المعقدة تكنولوجيا أهميتها القصوى في كل هذه الاستعمالات.

## تزويد القرى بالقوى المحركة:

وتطبيق آخر للطاقة الكهروضوئية هو تزويد القرى النائية فى بلدان العالم الثالث بالكهرباء، وتتوسع استعمالات هذه الطاقة فى ذلك المجال من القدرة اللازمة فى حالات العلاج الطارئة، إلى تبريد الأمصال والإنارة وتشغيل أجهزة الراديو والتليفزيون، والوحدات اللازمة لذلك جد صغيرة (١ - ٢٥ كيلووات). وفى هذا السياق غالباً ما تستعمل أجهزة ذات قدرة محدودة وكفاءة عالية - بربطها بالطاقة الكهروضوئية - مما يتيح تنوعاً واسعاً فى الخدمات التى تلبىها، وبالمثل تفضل المعدات التى تعمل بالتيار المستمر ومن ثم لا تحتاج إلى محولات.

‘ وفى معظم الحالات تستخدم البطاريات أيضاً لتخزين الطاقة والإمداد بها وفقاً للطلب.

وتعد الطاقة الكهروضوئية الآن ذات أسعار مفضلة فى المناطق النائية لدى مقارنتها بوحدة الديزل، إذا ما أدخل عمر المعدات فى الاعتبار، وبعد سنوات عديدة من النجاح وانتشار المعلومات الإيجابية عنها، يتنامى اليوم استخدام الطاقة الكهروضوئية فى المناطق النائية.

والسوق المتوقع لذلك فى مجال تزويد القرى بالطاقة هائل الحجم، وعلى مستوى العالم هناك ٥ مليون قرية بإمكانها استعمال الطاقة الكهروضوئية، ويعتبر إدخال هذه الطاقة بمثابة انفتاح لهذه القرى على العالم العصري الحديث، فهى تتيح الإنارة والاتصالات التليفونية ومشاهدة التليفزيون، وكثيراً ما تتيح الطاقة الكهروضوئية (مع وسائل التخزين فى بطاريات) فتح المدارس الليلية، تلك التى تجتذب عدداً أكبر من الدارسين وتقدم لهم وسائل مستحدثة قيمة للتعلم كالبرامج التليفزيونية التعليمية، وهو ما يستحيل تحقيقه بدون كهرباء، وزيادة الأواصر الاجتماعية، وهكذا فالطاقة الكهروضوئية ذات قدرة فريدة على تلبية احتياجات

العالم الثالث، وبوجه خاص لأولئك الأناس المحرومين من التسهيلات الحياتية التي تكفلها شبكات المرافق لعدم قدرتهم على تحمل نفقاتها بأنفسهم، وعندما تتدنى تكاليف الطاقة الكهروضوئية إلى متناولهم في القريب العاجل، ستكون هي محور استخدامهم للكهرباء.

## الاتصالات:

تستخدم الطاقة الكهروضوئية بالمثل في تغذية منظومات الاتصالات (التليفونات والتليفزيونات وأجهزة الراديو) في المناطق النائية، وتصلح هذه التطبيقات في النقل عبر قمم التلال أو الجبال، حيث تتجلى ميزة المنظومات الكهروضوئية في تخزين الطاقة في البطاريات، على النظم التي تستدعي التزود بالوقود أو الصيانة المكلفة.

وتكثر - هذه الأيام - البلاد التي تستعمل فيها الاتصالات التي تغذيها المنظومات الكهروضوئية، مثل:

١ - خطوط النقل الثانوية لشبكات التليفزيون والراديو.

٢ - أجهزة إعادة أو التكرار في التليفون الذي يعمل بالموجات الميكرونية.

٣ - كابينات التليفون المخصصة لحالات الطوارئ.

وتتباين ساعات المنظومات اللازمة من بضعة وئات (لمقصورات الهاتف) إلى عدة كيلو وئات لأجهزة التكرار بالموجات الميكرونية للتليفون، ويتم كل هذه الاستعمالات بعيداً عن الشبكة العمومية، وعادة في المناطق النائية التي تتعرض لظروف مناخية قاسية بما في ذلك الأمطار الغزيرة أو هطول الثلوج.

وأجهزة التكرار التى تعمل بالموجات الميكرونية من بين الاستعمالات ذات النجاح الفائق للطاقة الكهروضوئية المطبقة حالياً، ولها بطاريات تخزين تكفل الإمداد المستمر بالطاقة، وتستعمل أجهزة التكرار بالموجات الميكرونية فى نقل المكالمات التليفونية من أفق إلى أفق فى المناطق التى تكلف فيها خطوط التليفون السلكية كثيراً، فيكون البديل تزويد أجهزة التكرار بمولدات ديزل لا يكلف تشغيلها بالوقود قدر ما يكلف نقل الوقود بطائرة هليكوبتر (حوامة) أو وسيلة أخرى مماثلة إلى المناطق المنعزلة التى تفتقر إلى شبكة طرق، ومقصورات التليفون لإجراء المكالمات لدى الطوارئ آخذة فى الشروع والانتشار، وهى تستعمل الطاقة الكهروضوئية، وتدعمها البطاريات، وتتصل هذه المقصورات رأساً بدوريات أمن الطرق السريعة، وتستعمل فيها أجهزة التليفون ذات الخلايا.

### الإشارات التحذيرية:

من بين الاستخدامات الطبيعية للمنظومات الكهروضوئية (المدعومة بالبطاريات) فى المناطق النائية، تغذية الإشارات التحذيرية، وهذا المجال هو أحد أكبر الأسواق الحالية للمنظومات الكهروضوئية، وتقتنى هذه المنظومات، القوات المسلحة وخفر السواحل وصناعة النفط، والأحمال الزائدة، والهيئات المشرفة على الطرق السريعة وكثير من الهيئات غيرها، وفى جميع الأحوال تستعمل بطاريات تخزين لضمان الإمداد المستمر بالطاقة، وتستعمل هذه المنظومات فى:

- ١ - إشارات السكك الحديدية.
- ٢ - إشارات الطرق السريعة التحذيرية.
- ٣ - صفارات الإنذار فى حالات الفيضان والحالات الطارئة الأخرى.
- ٤ - المنارات الملاحية الإرشادية.
- ٥ - إشارات تحذير الطائرات.

## الرقابة عن بعد:

تستعمل منظومات كهروضوئية صغيرة (أقل من ٢٠٠ وات غالباً) فى المواقع النائية لمراقبة العديد من الظواهر، وفى كل الأحوال توجد بطاريات معاونة، ومن أمثلة مجالات استعمالها:

١ - جمع البيانات عن التلوث.

٢ - تسجيل البيانات السيزمية (الزلازلية).

٣ - المعلومات عن الطقس والمناخ.

٤ - الأحوال فوق الطرق السريعة.

وتمثل رقابة التلوث تطبيقاً آخداً فى التنامى للطاقة الكهروضوئية، حيث تؤخذ عينات من الهواء لأغراض البحوث وتحديد نوعيته، وقياس نسبة ثانى أكسيد الكربون وغيره من الغازات المسببة للاحتباس الحرارى فى المناطق المنعزلة، حيث يعكس تجميع البيانات متوسط أحوال جو الأرض أكثر من تعبيره عن الاضطرابات الجوية المحلية وهو استعمال آخر.

وتراقب الظروف المناخية بالمثل باستخدام أجهزة تعمل بالطاقة الكهروضوئية، فتقيس هذه الأجهزة درجة الحرارة وسرعة الرياح والمتغيرات الأخرى، وتنقل تلك المعلومات رأساً إلى محطات الأرصاد الجوية.

## السلع الاستهلاكية المعمرة:

كان استعمال الطاقة الكهروضوئية فى السلع المعمرة ابتكاراً ابتدعته أساساً الشركات اليابانية والأمريكية التى كانت فى سبيلها لتطوير الخلايا السليكونية، وقد تمكنت هذه الشركات بالمثل من الإفادة من التكلفة الزهيدة للخلايا السليكونية الصغيرة والمجموعات منها لتصنيع الحاسبات اليدوية والساعات وأجهزة الراديو

ولعب الأطفال وعربات دور الملاهي وخلق سوق رائجة لها، إلى جانب الإفادة منها في شحن بطاريات السيارات بصفة مستمرة في حالة عدم استعمالها لفترات طويلة، والمنتج الحديث هو مروحة السيارة التي تغذى بالطاقة الكهروضوئية، وتفرغ هذه المروحة السيارة من الهواء الساخن خلال وقوفها في الخارج، ويعتمد استعمال الطاقة الكهروضوئية في تشغيل السلع المعمرة مستقبلا على مدى جذب هذه السلع المبتكرة للمستهلكين.

**الباب الثالث**

**الطاقة الشمسية الحرارية**





## الإشعاع الشمسى:

### مقدمة:

تقل كمية الطاقة الشمسية المتاحة على سطح الأرض بصورة محسوسة عن تلك التى تصل إلى طبقات الجو العليا، ويتحدد مدى النقص فى طاقة الشمس عند وصولها سطح الأرض أساسًا بحالة الجو من حيث القدرة على الإبصار خلاله، ويؤثر تركيب الجو فى الإشعاع الشمسى من خلال عمليتين: الامتصاص والتشتيت.

وتعتمد كمية الامتصاص والتشتيت التى تحدث لمكون ما من الطيف الشمسى على تركيب الجو وكذلك على الطول الموجى لهذا المكون، وفى نطاقات معينة من الطيف يغلب التشتت على الطاقة الشمسية فى حين يكون امتصاص تلك الطاقة هو الأساس لدى نطاقات أخرى.

ولم يعد ممكنًا تشبيه تعرض اليابسة للشمس بتعرضها لشعاع مفرد الاتجاه، وهو ما كان يصلح بالنسبة للإشعاع الساقط على طبقات الجو العليا، فبعض من الإشعاع الذى يتشتت بفعل الجو يجد سبيله إلى سطح الأرض فى صورة إشعاع منتشر **Diffused**، ويتكون إجمالى الإشعاع الشمسى على سطح الأرض من جزء أو مكون مباشر (أو مفرد الاتجاه)، وجزء متشتت بفعل الجو.

ويعنينا الإشعاع الذى يتراوح طوله الموجى ما بين ٠,٣، ٣ ميكرون، وهو النطاق من الطيف الذى يضم معظم الطاقة التى تشعها الشمس، وعلى كل فإن فهم طبيعة الإشعاع القادم من خارج الأرض، وتأثير الغلاف الجوى فى إضعافه،

وتأثير زاوية توجه السطح المستقبل له، لكل ذلك أهميته فى استيعاب بيانات الإشعاع الشمسى واستخداماته.

### فيزيائيات الشمس:

الشمس عبارة عن كرة مادية من الغازات الساخنة يصل قطرها إلى  $1,39 \times 10^9$  متر، تبعد عن الأرض فى المتوسط بمسافة  $1,5 \times 10^{11}$  متر، وتدور الشمس حول محورها بمعدل مرة كل أربعة أسابيع على وجه التقريب، ولكنها لا تدور كجسم صلب متماسك، ففى حين يتم خطها الاستوائى دورته فى ٢٧ يومًا تستغرق مناطقها القطبية زهاء ٣٠ يومًا لكل دورة.

وللشمس درجة حرارة فعالة كجسم أسود قدرها ٥٧٦٢ على مقياس كلفن، ودرجة الحرارة بمناطقها الباطنية تقدر بنحو  $8 \times 10^7$  إلى  $40 \times 10^7$  كلفن، وكثافتها هناك قدر كثافة الماء مائة مرة.

والشمس فى واقع الحال بمثابة مفاعل اندماجى دائب العمل، يحتفظ بمكوناته الغازية بفعل قوى الجاذبية، وخلال عملية الاندماج تقترن أربع ذرات من الهيدروجين (أى أربعة بروتونات) لتكون نواة هليوم واحدة، وتتولد طاقة بباطن الكرة الشمسية عند درجة حرارة تبلغ عدة ملايين درجة مئوية، فتنتقل نحو الخارج إلى سطح الشمس، ومن ثم تشع فى الفضاء.

ويوضح شكل (٣ - ١) رسمًا تخطيطيًا لتركيب الشمس، وتقدر نسبة ٩٠% من الطاقة المتولدة فى النطاق من صفر حتى ٠,٢٣ نق (حيث نق هنا هو نصف قطر الشمس)، وهو النطاق الذى يحتوى على ٤٠% من كتلة الشمس، وعلى بعد ٠,٧ نق من المركز، تهبط درجة الحرارة إلى ١٣٠٠٠٠ درجة كلفن، وتهبط الكثافة إلى ٧٠ كيلو جرامًا لكل متر مكعب، وهناك تبدأ أهمية تيارات الحمل

(المنطقة من ٠,٧ إلى ١ نق تعرف باسم منطقة تيارات الحمل)، وفي هذا النطاق تهبط درجة الحرارة إلى نحو ٥٠٠٠ ك° والكثافة إلى ١٠<sup>-٥</sup> كجم/م<sup>٣</sup> تقريباً<sup>(\*)</sup>.

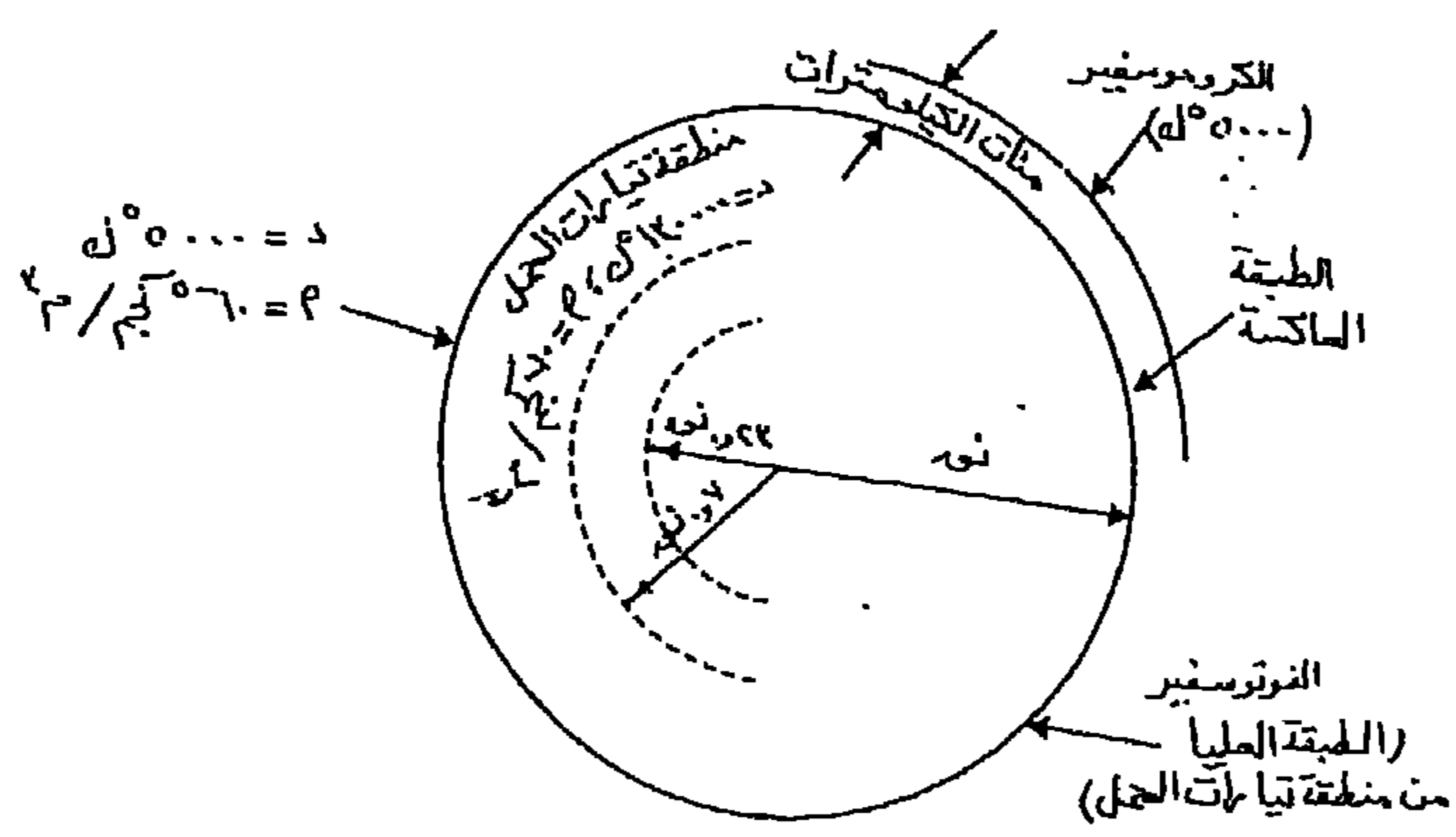
والطبقة الخارجية من منطقة تيارات الحمل تسمى بالكرة الضوئية Photosphere وكثافة طبقة الفوتوسفير حوالى جزء من عشرة آلاف من كثافة الهواء عند منسوب سطح البحر<sup>(\*)</sup>، وهى أساساً معتمدة، إذ أن الغازات التى تكونها شديدة التأين، وبمقدورها أن تمتص (أو تطلق) كامل نطاق الإشعاع، والفوتوسفير هو مصدر أغلب الإشعاع الشمسى، وتوجد أعلى الفوتوسفير طبقة من غازات أكثر برودة يمتد عمقها إلى عدة المئات من الكيلومترات يطلق عليها الطبقة العاكسة، وتقع خارجها طبقة تسمى بالكرة اللونية (الكروموسفير) عرضها زهاء ١٠٠٠٠ كيلو متر، وهى طبقة غازية درجة حرارتها تزيد يسيراً عن درجة حرارة الفوتوسفير وذات كثافة أقل، وإلى الخارج من كل تلك الطبقات هناك الهالة الشمسية Corona ذات الكثافة القليلة جداً، ودرجة حرارتها مليون ك°، ومن ثم فالإشعاع الشمسى هو محصلة إشعاع الطبقات المتعددة التى تطلق وتمتص الإشعاع ذا الأطوال الموجية المختلفة، وقد تم - بوسائل متنوعة - قياس الإشعاع الشمسى خارج الغلاف الجوى الأرضى وتوزيعه الطيفى.

### وضع الشمس بالنسبة للأرض:

يميل محور دوران الأرض (المحور الواصل بين القطبين) بزاوية مقدارها ٢٣,٥ درجة، عن محور دائرة البروج، وهو المحور العمودى على دائرة البروج، أى على مستوى دوران الأرض حول الشمس، وهذا الميل فى محور الأرض عن الوضع العمودى على مستوى المدار حول الشمس يجعل نصف الكرة الشمالى مائلاً ناحية الشمس صيفاً وبعيداً عن الشمس شتاءً، ومن ثم تحدث التغيرات الفصلية على الأرض.

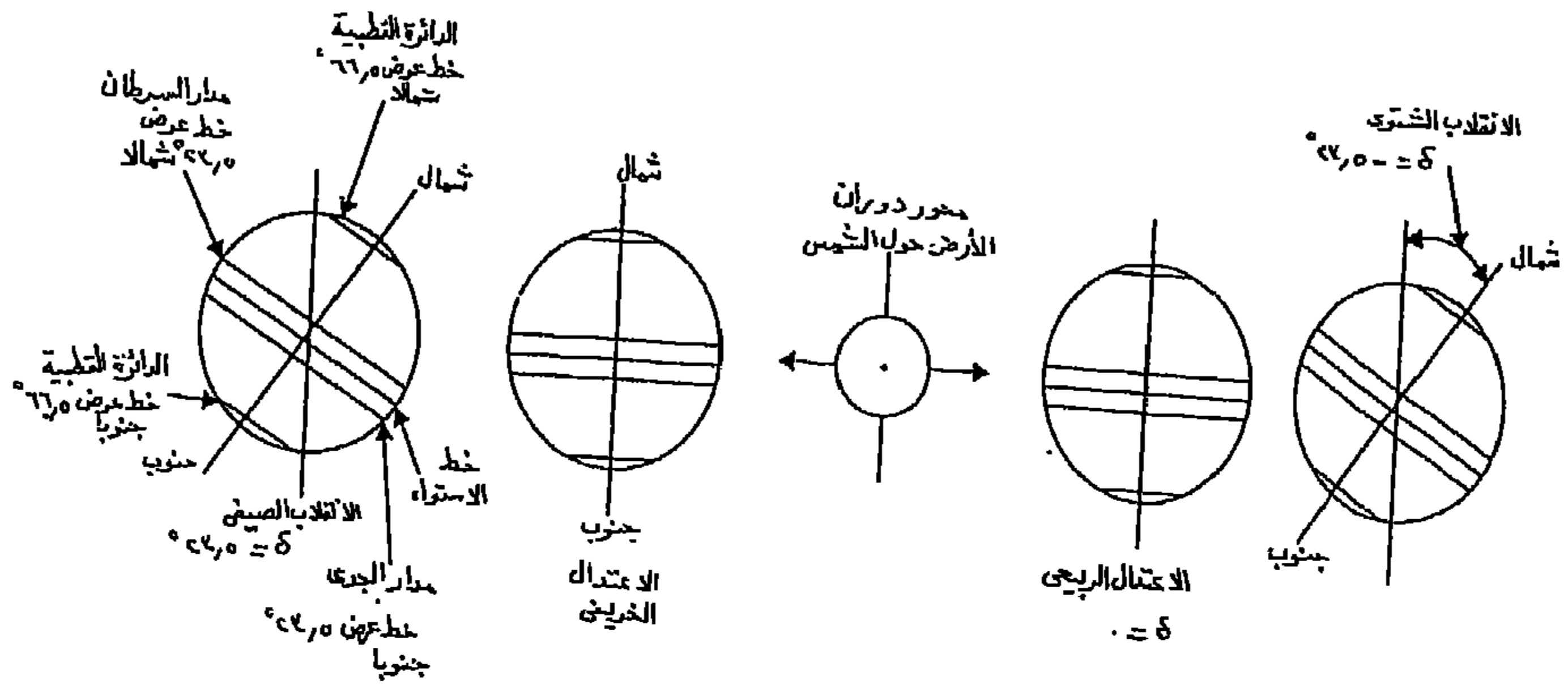
---

(\*) كما ورد بالأصل (المترجم)



شكل ( ٣ - ١ )

تكوين الشمس



شكل ( ٣ - ٢ )

العلاقات الهندسية بين الشمس والأرض

وبين شكل ( ٣ - ٢ ) الدائرة القطبية وشبه القطبية ومدارى السرطان والجدى بالنسبة للشمس فى الفصول الأربعة.

والإشعاع الشمسى الواصل للأرض هو دالة فى الشكل الهندسى للسطح الذى يستقبله فى وضعه بالنسبة للشمس، ومن الضرورى أن نأخذ فى الاعتبار الزوايا الهندسية المتعددة التى تحدد علاقة سطح كل من الشمس والأرض بالنسبة لبعضهما، ويوضح شكل ( ٣ - ٣ ) نقطة على سطح الأرض (ن) تتعرض لأشعة الشمس.

وخط العرض  $\theta$  الذى تقع عليه النقطة ن تحدد المسافة الزاوية بين النقطة شمال أو جنوب خط الاستواء (وتعتبر موجبة فى حالة خط العرض الواقع فى الشمال) وهى الزاوية ما بين الخط م ن الواصل من هذه النقطة ن ومركز الأرض م، ومسقط الخط م ن على مستوى خط الاستواء.

والانحدار الشمسى  $\delta$  هو المسافة الزاوية ما بين أشعة الشمس شمال (أو جنوب) خط الاستواء (حيث يعتبر الانحدار موجباً فى حالة الشمال)، وهو الزاوية ما بين المستقيم الواصل ما بين مركزى الشمس والأرض، ومسقط هذا المستقيم على مستوى خط الاستواء، ويتراوح مقدار الانحدار ما بين ٠ (صفر) درجة عند الاعتدال الربيعى، + ٢٣,٥ درجة عند الانقلاب الصيفى، صفر درجة عند الاعتدال الخريفى إلى - ٢٣,٥ درجة عند الانقلاب الشتوى.

وتعطى المعادلة التالية الانحدار مقداراً بالدرجات لأى يوم من أيام السنة:

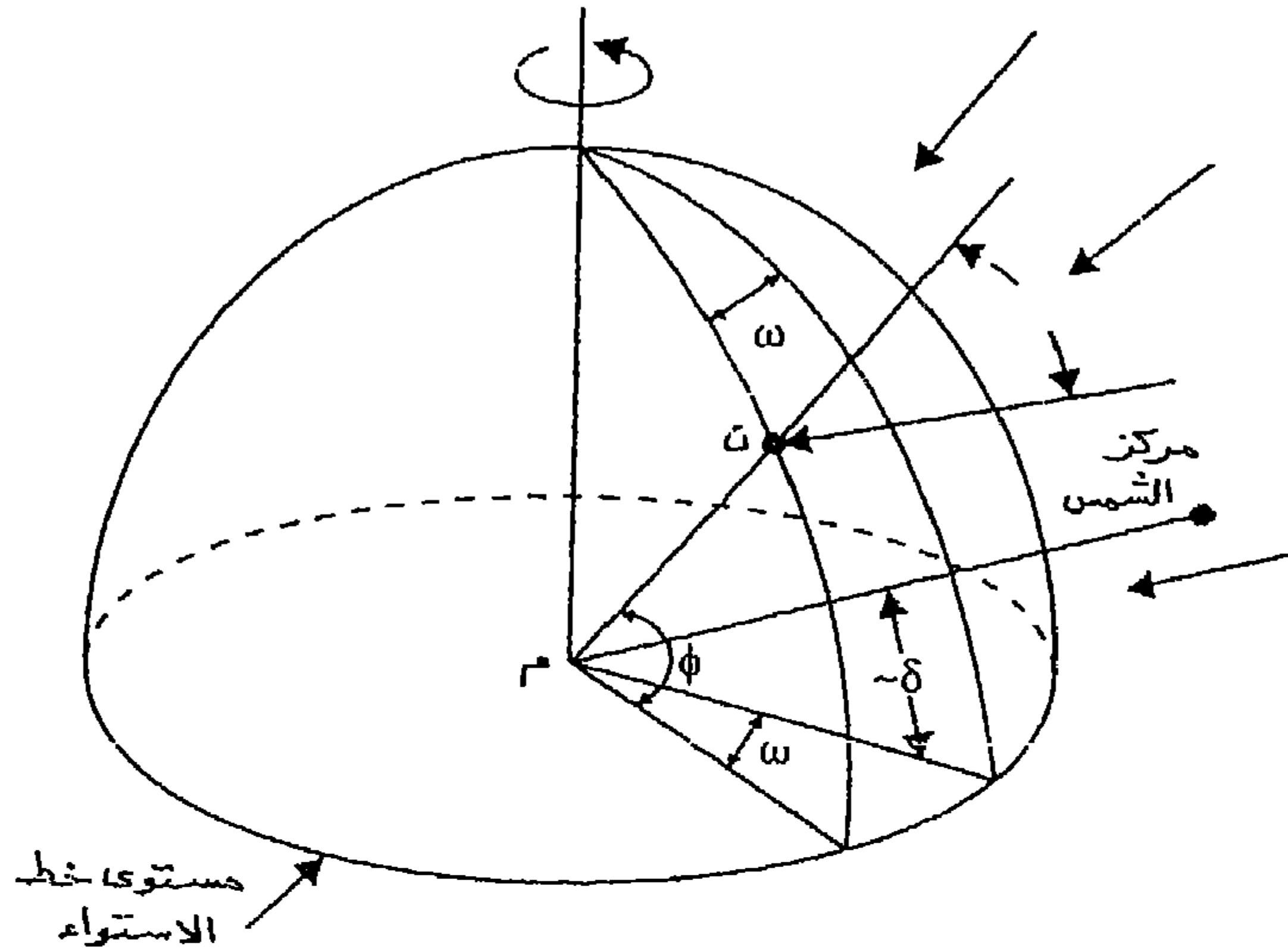
$$\delta = 23,45 \text{ جا } \left[ \frac{360}{365} (N + 284) \right]$$

حيث ن هو ترتيب اليوم فى السنة، ويعتبر الانحدار الشمسى خلال يوم ما ثابتاً فى الحسابات الهندسية، وزاوية الساعة  $\omega$  لنقطة ما على سطح الأرض تعرف

بأنها الزاوية التي تدورها الأرض حتى يصبح خط الطول الذي تقع عليه النقطة تحت الشمس مباشرة.

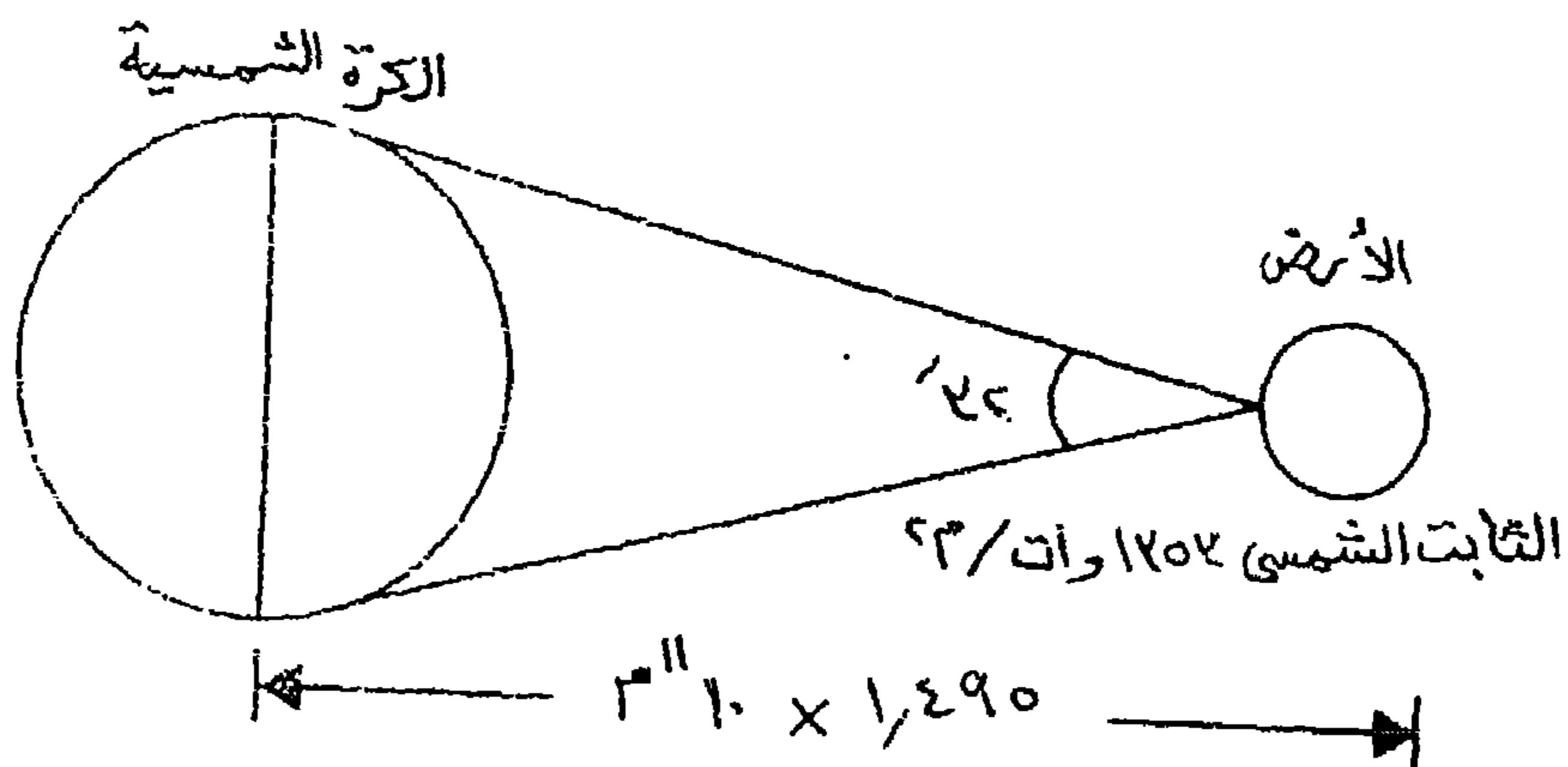
وشكل (٣ - ٣) يوضح زاوية الساعة للنقطة ن مقيسة على مستوى خط استواء الأرض ما بين مسقط الخط م ن، ومسقط المستقيم الواصل بين مركزي الشمس والأرض، وتصل قيمة زاوية الساعة إلى الصفر عند الظهيرة الشمسية محلياً، وكل  $\frac{360}{24}$  (أى ١٥ درجة من خطوط الطول) تكافئ ساعة زمنية واحدة، وذلك باعتبار ساعات بعد الظهر (بعد ١٢ ظهراً) ذات إشارة موجبة.

وعلى سبيل المثال  $\omega = 30 -$  درجة عند العاشرة صباحاً،  $\omega = 30 +$  درجة عند الثانية بعد الظهر، وزاوية الساعة بالدرجات  $\omega = \pm \frac{1}{4}$  (عدد الدقائق منذ وقت الظهيرة الشمسية المحلية)، حيث تدل الإشارة الموجبة على فترة ما بعد الظهيرة والإشارة السالبة على ما قبل الظهيرة.



شكل (٣ - ٣)

زاوية خط العرض  $\phi$ ، زاوية الساعة  $\omega$  والاتحاد الشمسي  $\delta$



شكل (٣ - ٤)

علاقات المسافة بين الشمس والأرض

### الثابت الشمسي:

يبين شكل (٣ - ٤) رسمًا تخطيطيًا للعلاقة الهندسية بين الشمس والأرض، وبسبب لا مركزية مدار الأرض فإن المسافة بين الشمس والأرض تتغير في مدى ١,٧%، وعلى مسافة وحدة فلكية واحدة (١,٤٩٥ × ١٠<sup>١١</sup> متر)، وهي متوسط بعد الأرض عن الشمس، تحصر الشمس زاوية قدرها ٣٢ (دقيقة)، وينتج عن مقدار الإشعاع المنبعث من الشمس، وعلاقتها المكانية بالأرض ثبات شدة الإشعاع الشمسي تقريبًا خارج نطاق جو الأرض.

والثابت الشمسي  $G_{sc}$  هو مقدار الطاقة الشمسية في وحدة الزمن الذي تتلقاه وحدة مساحة من سطح الأرض عمودية على اتجاه انتشار الإشعاع، عند متوسط بعد المسافة عن الشمس خارج الغلاف الجوي، وتؤخذ قيمة الثابت الشمسي مساوية لـ ١٣٥٣ وات/م<sup>٢</sup>.



## تعريفات مهمة:

### إشعاع الشعاع الضوئي:

هو الإشعاع الشمسي المتلقى من الشمس بافتراض عدم تشتته بفعل جو الأرض، وغالبًا ما يشار إلى إشعاع الشعاع الضوئي بالإشعاع الشمسي المباشر.

### الإشعاع التسريبي:

هو الإشعاع المتلقى من الشمس بعد أن ينحرف اتجاهه ويتشتت بتأثير جو الأرض، ويطلق على الإشعاع المتسرب في بعض المراجع المناخية (الإشعاع السماوي) أو (الإشعاع السماوي الشمسي).

### الإشعاع الشامل:

إجمالي الإشعاع الشمسي (مجموع إشعاعي الشعاع الضوئي والإشعاع التسريبي) على سطح أفقي هو ما يطلق عليه غالبًا الإشعاع الشامل.

### السطوع أو التآلق irradiance (وات/م<sup>2</sup>):

هو المعدل الذي تسقط به طاقة الإشعاع على وحدة المساحات (المتر المربع).

### طاقة الإشعاع irradiation (جول/م<sup>2</sup>):

هو كمية الطاقة الساقطة على وحدة مساحات والتي نحصل عليها بعملية تكامل رياضية للسطوع بالنسبة للزمن عبر مدة زمنية معينة، عادة ما تكون ساعة أو يومًا.

(والتشمس أو التعرض للشمس insulation) هو مصطلح خاص بطاقة الإشعاع الشمسي تحديداً، ويستخدم الرمز (ي) H للدلالة على التشمس لمدة يوم، والرمز (س) I للدلالة على التشمس لمدة ساعة.

### التوزيع الطيفي للإشعاع خارج غلاف الأرض الجوي:

بالإضافة إلى الطاقة الكلية للطيف الشمسي (أي الثابت الشمسي) تفيدنا معرفة التوزيع الطيفي للإشعاع خارج غلاف الأرض الجوي، وباعتبار الثابت الشمسي =  $1353 \text{ وات/م}^2$ ، تكون نسب الطاقة في النطاقات فوق البنفسجية ونطاق الضوء المرئي وتحت الحمراء كما يلي:

نطاق الطول الموجي (بالميكرون)	$0.38 - 0.78$	$0.78 - 4.0$	فوق $4.0$
النسبة داخل النطاق	$0.0700$	$0.4729$	$0.4571$
الطاقة داخل النطاق وات/م <sup>2</sup>	$95$	$640$	$618$

وهكذا فإن الإشعاع الشمسي الساقط على جو الأرض له التوزيع الطيفي المبين أعلاه، والأشعة السينية، وغيرها من الأشعة ذات الطول الموجي القصير في الطيف الشمسي تمتص بدرجة كبيرة في طبقة الأيونوسفير بواسطة النيتروجين والأكسجين وغيرها من مكونات الجو، ويمتص الأوزون أغلب الأشعة فوق البنفسجية، ولدى الأطوال الموجية أكثر من  $2.5$  ميكرون، يقتصر إشعاع قليل من خارج جو الأرض بامتصاص قوى بفعل ثاني أكسيد الكربون والماء، مما يؤدي إلى وصول نسبة ضئيلة فقط من الطاقة للأرض، وعلى ذلك ومن وجهة نظر تطبيقات الطاقة الشمسية خارج جو الأرض لا يعتد إلا بالإشعاع ذي الطول الموجي ما بين  $0.29$ ،  $2.5$  ميكرون.

## الزمن الشمسى:

هو الزمن المحسوب على أساس الحركة الزاوية الظاهرية للشمس عبر السماء، باعتبار وقت الظهيرة الشمسى هو الوقت الذى تعبر فيه الشمس خط الطول الذى يقف عليه الراصد، ولا ينطبق الزمن الشمسى مع توقيت الساعة المحلى، ومن الضروري تحويل الزمن المحلى إلى التوقيت الشمسى بإجراء التعديل التالى:

$$\text{التوقيت الشمسى} = \text{التوقيت القياسى} + ٤ (ل ق - ل م) + ز$$

حيث ز هى معادلة الزمن بالدقائق، ل ق هو خط الطول القياسى (\*) بالنسبة لتوقيت المنطقة المحلى، ل م هو خط الطول فى الموقع المطلوب مقدراً بالدرجات غرباً.

$$ز = ٩,٨٧ \text{ جا } ٢ \text{ ب} - ٧,٥٣ \text{ جتا ب} - ١,٥ \text{ جاب}$$

$$\text{حيث ب} = \frac{٣٦٠ (٨١ - ن)}{٣٦٤} ، ن = \text{ترتيب اليوم فى السنة} (١ \leq ن \leq ٣٦٥)$$

## الكتلة الهوائية Air Mass:

هو النسبة (م) ما بين المسافة خلال الغلاف الجوى التى يمر خلالها شعاع الإشعاع وبين المسافة إذا كانت الشمس فى السمى (زاوية السمى  $\theta$  س هى الزاوية المحصورة بين الخط الرأسى الواصل إلى السمى، وهو النقطة الواقعة عمودياً فوق سمى الرأس، وخط رؤية الشمس)، وعلى ذلك فعند مستوى سطح البحر، م = ١ عندما تكون الشمس فوق سمى الرأس، م = ٢ عند زاوية سمى  $\theta$  س = ٦٠°. ولقيم زاوية السمى الواقعة بين صفر، ٧٠° تكون:

$$م = ١ \div \text{جتا } \theta \text{ س}$$

---

(\*) يتخذ الوقت القياسى فى الهند على أساس خط طول ٨٢,٥٠ شرقاً.

ولمقادير زاوية السميت الأعلى من ذلك، يغدو تأثير انحناء سطح الأرض ذا أثر محسوس.

### الزوايا والعلاقات بينها:

إذا رمزنا بالرموز  $\theta$  لخط العرض.

$\delta$  الميل (زاوية الانحدار الشمسي)

$\beta$  الزاوية بين السطح المستوي محل الاعتبار والمستوى الأفقي (شكل ٣ - ٥)

$\gamma$  زاوية السميت السطحية، أي الانحراف في الإسقاط على مستوى أفقي عن الاتجاه العمودي على السطح من خط الطول المحلي، باعتبار الاتجاه للجنوب صفراً، والاتجاه للشرق سالباً والاتجاه للغرب موجباً ( $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ ).

$\omega$  زاوية الساعة.

$\theta$  زاوية السقوط، أي الزاوية ما بين اتجاه شعاع الإشعاع على سطح ما والاتجاه العمودي على ذلك السطح.

فتكون العلاقة التي تربط زاوية سقوط الإشعاع  $\theta$  بالزوايا الأخرى في الصورة:

$$\cos \theta = \cos \delta \cos \theta \cos \beta - \sin \delta \sin \beta \cos \gamma$$

$$+ \sin \delta \cos \theta \sin \beta \sin \gamma$$

$$+ \sin \delta \sin \theta \cos \beta \sin \gamma$$

$$+ \sin \delta \sin \theta \sin \beta \sin \gamma$$

ولسطح أفقي ( $\beta = 0^\circ$ ) ولزاوية سقوط تساوي زاوية السميت للشمس

$$\theta_s = \delta_s \cos \theta_s \cos \beta_s + \sin \delta_s \sin \beta_s \cos \gamma_s$$

وزاوية السميت الشمسية  $\gamma_s$  هي الإزاحة الزاوية بين اتجاه الجنوب واتجاه

مسقط شعاع الإشعاع على المستوى الأفقي، وزاوية ارتفاع الشمس  $\Theta = 90^\circ - \theta$

$\alpha$  ويمكن التعبير عن  $\gamma$  بالعلاقة:

$$\text{جا } \gamma = \text{جتا } \delta \frac{\text{جا } \omega}{\text{جتا } \alpha}$$

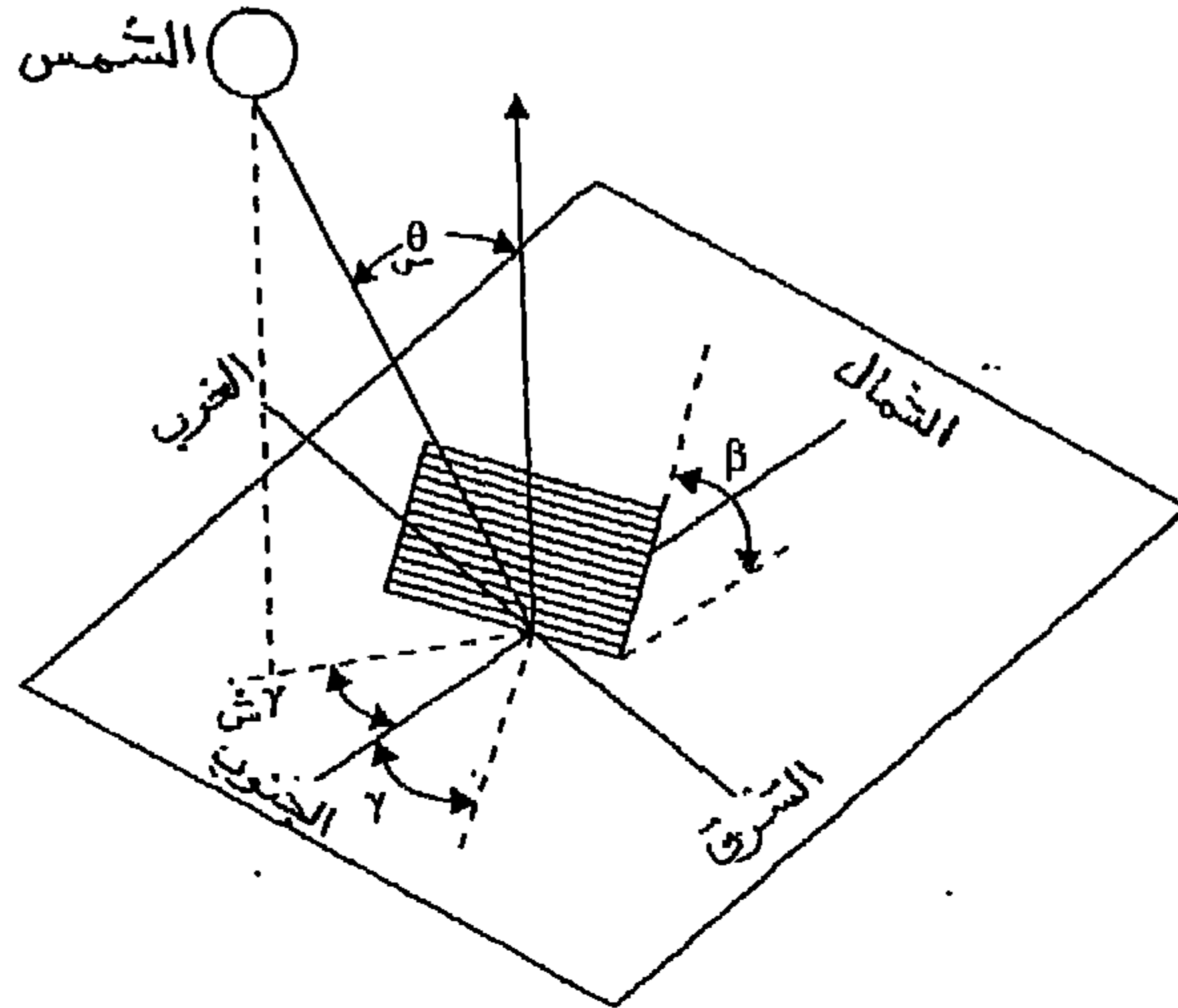
ويمكن حل المعادلة السابقة بالنسبة لزاوية الساعة لدى غروب الشمس  $\omega$  غ، عندما تكون  $\theta = 90^\circ$

$$\text{جتا } \omega \text{ غ} = \frac{\text{جا } \delta \cdot \text{جا } \delta}{\text{جتا } \delta \cdot \text{جتا } \delta} = - \text{ظا } \delta \text{ ظا } \delta$$

حيث  $\omega$  غ موجبة لدى غروب الشمس، وحيث إن زاوية الساعة عند توقيت الظهيرة المحلي = ٠، فإن كل ١٥ درجة على خطوط الطول تناظر ساعة واحدة، وعلى ذلك فإن توقيت الشروق والغروب مقدرًا بالساعات، اعتبارًا من الظهيرة =  $\frac{1}{15} \text{ جتا}^{-1} (-\text{ظا } \delta \text{ ظا } \delta)$ .

ونستنتج كذلك أن عدد ساعات النهار يعطى بالمعادلة:

$$Z = \frac{2}{15} \text{ جتا}^{-1} (-\text{ظا } \delta \text{ ظا } \delta)$$



شكل (٣ - ٥)

زاوية السميت، والميل، وزاوية سميت السطح وزاوية سميت الشمس لسطح مائل

## الإشعاع من خارج الغلاف الجوى على سطح أفقى:

لإجراء الحسابات، من وجهة النظر الهندسية، فإن درجة عدم التيقن، والتباين الحادث فى أثناء الانتقال عبر الغلاف الجوى، إلى جانب القياسات المبدئية الموثوق بها، تشير جميعها إلى أن مقدار الطاقة المنبعثة من الشمس يعد ثابتاً، وتعتبر المعادلة التالية عن علاقة الإشعاع من خارج الغلاف الجوى والوقت من السنة.

$$\text{ش ع} = \text{ث ش} [ 1 + 0.033 \cos \frac{360}{365} \text{ جتا } \theta ]$$

حيث ش ع هو مقدار الإشعاع خارج الغلاف الجوى الساقط على سطح فى اتجاه عمودى عليه.

عند أى لحظة من الزمن يقدر الإشعاع الشمسى خارج الغلاف الجوى الواقع على سطح أفقى من المعادلة.

$$\text{ش.} = \text{ث ش} [ 1 + 0.033 \cos \frac{360}{365} \text{ جتا } \theta ] \text{ جتا } \theta \text{ س} \quad (1-3)$$

حيث ث ش الثابت الشمسى، ن هو ترتيب اليوم فى السنة، والمقدار  $(1 + 0.033 \cos \frac{360}{365})$  هو الإشعاع من خارج الغلاف الجوى الساقط على سطح عمودى على الإشعاع.

$$\text{ش.} = \text{ث ش} [ 1 + 0.033 \cos \frac{360}{365} \text{ جتا } \theta ] ( \cos \delta + \sin \delta \sin \theta ) \quad (2-3)$$

وغالباً ما نحتاج لحساب الإشعاع الشمسى اليومى، إلى إجراء عملية تكامل للإشعاع من خارج الغلاف الجوى على مدار اليوم على سطح أفقى (ط.)، ويتم ذلك بإجراء تكامل رياضى للمعادلة (2-3) عبر الفترة من شروق الشمس إلى غروبها.

فإذا ما قيس الثابت ث بـ بالوات لكل متر مربع فتكون قيمة طـ بالجول / م<sup>٢</sup>.

$$\text{طـ} = \frac{3600 \times 24}{\text{ط}} \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{360}{365} \right) \right] \times \left[ \cos \delta \cos \omega + \sin \delta \sin \omega \right] \quad (2)$$

حيث  $\omega$  بـ زاوية الساعة لدى الغروب بالدرجات (مع مراعاة الإشارة).

ومن الأهمية بالمثل حساب مقدار الإشعاع من خارج الغلاف الجوى على سطح أفقى فى خلال ساعة بعينها، فبإجراء تكامل للمعادلة (٣-٢) لمدة محددة بزاويتى ساعة  $\omega_1$ ،  $\omega_2$  بينهما ساعة من الزمن (حيث  $\omega_2$  تتناظر الزمن الأطول) نحصل على:

$$\text{سـ} = \frac{3600 \times 12}{\text{ط}} \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{360}{365} \right) \right] \times \left[ \cos \delta \cos \omega_1 + \sin \delta \sin \omega_1 \right] - \left[ \cos \delta \cos \omega_2 + \sin \delta \sin \omega_2 \right] \quad (3)$$

مثال (١): احسب زاوية ارتفاع الشمس بعد ساعتين من الظهيرة طبقاً للتوقيت المحلى فى يوم ١ يونيو لمدينة واقعة على خط عرض ٢٦,٧٥ درجة شمالاً، واحسب توقيت الشروق والغروب وطول ساعات النهار.

الحل: عند الأول من يونيو،  $N = 152$ ، وتكون زاوية الميل  $\delta$  حيث:

$$\delta = 23,45^\circ = \left[ \left( 152 + 284 \right) \frac{360}{365} \right] + 22^\circ$$

وزاوية الساعة بعد ساعتين من الظهيرة طبقاً للتوقيت المحلى =  $\omega$ ، حيث  $\omega = 30^\circ + \frac{1}{4}(120) = 30^\circ$

وتحسب زاوية ارتفاع الشمس من المعادلة:  $\alpha = \cos \delta \cos \omega + \sin \delta \sin \omega$

$$= \cos 23,45^\circ \cos 30^\circ + \sin 23,45^\circ \sin 30^\circ = 0,953$$

$$\therefore \alpha = \text{جا}^{-1} (0,953) = 72,364 = 72,4^\circ \text{ تقريبًا}$$

$$\text{وطول ساعات النهار} = \frac{2}{15} \text{ جتا}^{-1} (-\text{ظا } \delta \text{ ظا } \delta)$$

$$= \frac{2}{15} \text{ جتا}^{-1} (-\text{ظا } 26,75 \text{ ظا } 22) = 10,43 \text{ ساعة}$$

ويعنى ذلك أن الشمس تشرق الساعة ١٢ - ٥,٢ = ٦,٨ أى الساعة ٦ والدقيقة ٤٨ صباحًا وتغرب الساعة ٥,٢ أى الساعة ٥ والدقيقة ١٢ مساءً.

مثال (٢): احسب الزمن الشمسى لمدينة تقع على خط الطول ٨٠,٥ شرقاً يوم ١٥ مارس فى الساعة العاشرة وثلاثين دقيقة صباحاً طبقاً للتوقيت القياسى للهند.

الحل: خط الطول القياسى بالنسبة لتوقيت الهند القياسى هو ٨٢° ٣٠' شرقاً، ومعادلة الوقت بالنسبة ليوم ١٥ مارس (ن = ٧٤) تعطى بالعلاقة:

$$\text{ب} = \frac{360}{364} (ن - ٨١) = \frac{360}{364} (٧٤ - ٨١) = -٦,٩$$

وتأخذ معادلة الوقت الصورة ٩,٨٧ جا ٢ ب - ٧,٥٣ جتا ب - ١,٥ جا ب

$$= ٩,٨٧ \text{ جا } (٢ \times -٦,٩) - ٧,٥٣ \text{ جتا } (-٦,٩) - ١,٥ \text{ جا } (-٦,٩) = -١٠ \text{ دقائق}$$

ويحسب الزمن الشمسى عند الساعة ١٠، ٣٠ دقيقة وفقاً للتوقيت الهندى القياسى (ت هـ ق) من المعادلة.

ت هـ ق - ٤ (خط الطول القياسى - خط الطول المحلى) + معادلة الوقت، حيث يحسب معامل التصحيح لخط الطول من الصيغة ٤ (٨٢,٥ - ٨٠,٥) = ٨ دقائق.



فيكون التوقيت الشمسي = (١٠ س ٣٠ ق) - (٨ س ٨ ق) - (١٠ س ١٠ ق) =  
١٠ س ١٢ ق قبل الظهر

مثال (٣): احسب زاوية السميت للشمس عند "لوكناو" (٢٦,٧٥° شمالاً) عند الساعة ٩، ٣٠ دقيقة يوم ١٦ فبراير.

الحل: تعطى هذه البيانات ميلا declination قدره - ١٣,٠°

ويمكننا استعمال المعادلة جتا  $\theta$  = جتا (-١٣) جتا (٢٦,٧٥) جتا  
(-٣٧,٥) + جتا (-١٣) جتا (٢٦,٧٥)

$$\therefore \text{جتا } \theta = ٠,٥٨٩$$

$$\theta = \cos^{-1}(٠,٥٨٩) = ٥٣,٩١٤^\circ$$

### قياسات مقدار الإشعاع الشمسي المتاح:

ليس بالإمكان (من الوجهة العملية) تأسيس الحسابات عن الإشعاع الشمسي على الإضعاف الذي يحدثه به الغلاف الجوي، فالمعلومات عن الظروف الجوية نادرًا ما تتكامل، ومن ثم نلجأ إلى القياسات التاريخية عن الإشعاع الشمسي في الموضع المطلوب للتنبؤ بأداء الشمس مستقبلاً، وتفيدنا هنا القياسات كل ساعة عن الإشعاع الشمسي على سطح أفقى، فى محاكاة العمليات الشمسية، وغالبًا ما تكون البيانات اليومية أكثر توفرًا، وبالتالي نقيم التقديرات كل ساعة على أساس هذه البيانات اليومية، وفى بعض عمليات التصميم قد تستعمل البيانات عن الإشعاع الشمسي الشهرى الكلى على سطح أفقى.

ومما يسهل المهمة تقسيم الإشعاع الشمسي إلى نطاقين من حيث الطول الموجي:

(١) الإشعاع قصير الموجة: وهو الإشعاع الصادر من الشمس فى نطاق الأطوال الموجية من ٠,٣ إلى ٣ ميكرون.

(٢) الإشعاع طويل الموجة: وهو الإشعاع القادم من مصادر ذات درجة حرارة تقارب درجات الحرارة السائدة وعلى ذلك فله طول موجى أكبر من ٣ ميكرون، وينبعث هذا الإشعاع طويل الموجة من الغلاف الجوى عن طريق مجمع أو أى جسم آخر فى درجات الحرارة السائدة.

وتنقسم أدوات قياس الإشعاع الشمسى إلى الأنواع الثلاثة الآتية:

(١) بيرهليومتر Pyrheliometer: وهو أداة تقيس الإشعاع الوافد من الشمس، ومن المنطقة الصغيرة من السماء التى تحيط بالشمس (أى الإشعاع الحزمى beam radiation) فى ظروف السقوط العمودى.

(٢) البيرانومتر: وهو أداة لقياس الإشعاع الشمسى الكلى فى نصف الكرة الأرضية (أى إشعاع الحزمة + الإشعاع المتشتت) على سطح أفقى عادة، وإذا ما حجب عنه الإشعاع الحزمى بواسطة حلقة مظلة Shading ring (\*) فإن البيرانومتر يقيس الإشعاع الانتشارى.

(٣) مسجل درجة سطوع الشمس: ويستعمل هذا المسجل لرصد ساعات الشمس الساطعة، وساعات السطوع المتألق (الوقت الذى يكون فيه قرص الشمس مرئيًا) تفيدنا فى تقدير الإشعاع الشمسى المتوسط على المدى الطويل.

---

(\*) حلقة من النحاس أو الفضة تتركب حول مادة حديدية كمغناطيس كهربى تعمل عمل الملف الثانوى، حيث تتولد بها قوى كهرومغناطيسية (المترجم)

قياس الإشعاع الشمسي المباشر الساقط عمودياً باستعمال البيرهليومتر التعويضي لأنجستروم:

في الهند، غالباً ما يستعمل البيرهليومتر التعويضي لأنجستروم **Angstrom Compensation Pyrheliometer** لقياس شدة الإشعاع الشمسي المباشر، وقد شيد ك. أنجستروم هذا البيرهليومتر لأول مرة عام ١٨٩٣ ثم عدل من خلال عدة تطويرات منذ ذلك الحين، ويوجد بالجهاز عضو استشعار مثبت بالطرف الأسفل لأنبوبة، ومزود بأغشية، بحيث يكون سطح الاستشعار - عندما توجه الأنبوبة صوب الشمس - عمودياً على المستقيم الواصل من الشمس إلى جزء الاستقبال، فلا يتلقى عضو الاستشعار إلا الإشعاع الوافد من الشمس، ومن حلقة ضيقة من مساحة السماء، ويقوم بتحقيق هذه الاستقامة جهاز رؤية يسمى الديوبتر.

### أساس عمل البيرهليومتر التعويضي لأنجستروم:

بيرهليومتر أنجستروم التعويضي هو أداة قياسية عيارية لقياس الإشعاع الشمسي المباشر، حيث تمتص طاقة الإشعاع شريحة معدنية مطلية بالسواد ومعرضة لأشعة الشمس، وتقاس الطاقة بمقياس التيار الكهربى اللازم لتسخين شريحة معزولة مماثلة لها، إلى نفس درجة الحرارة، وحيث إن الشريحتين مركبتان بنفس الكيفية ولهما نفس درجة الحرارة فإن التبادل الحرارى بينهما وبين الجو المحيط بهما متماثل، ومعدل تولد الحرارة فى الشريحة المعزولة نتيجة للتيار الكهربى يعادل معدل امتصاص الشريحة المعرضة لطاقة الإشعاع. والتحقق من التكافؤ أو عدم التكافؤ فى درجة حرارة الشريحتين يتم بواسطة ازدواجين حراريين حساسين مركبين بظهرى الشريحتين، وموصلين على التوالى مع جهاز جلفانومتر حساس، ويقاس التيار المار عبر الشريحة المعزولة بدقة ملليمترية أى إلى مستوى

المللى، وميزة هذه الأدوات هي أن التيار المناظر المار خلال الشريحة المعزولة لا يتأثر بالتغيرات في وتيرة الفقد الحرارى من الشريحتين بشرط أن تؤثر التغيرات عليهما بصورة متعادلة.

ومن الناحية النظرية فهي أداة مطلقة في القياس لأن كل العوامل ذات العلاقة اللازمة لحساب شدة الإشعاع يمكن قياسها:

فإذا كانت ش = شدة الإشعاع الشمسى المباشر بالوات / سم<sup>٢</sup>

س = مساحة الشريحة.

$\alpha$  = معامل امتصاص absorptance الشريحة.

م = مقاومة الشريحة الكهربائية.

ت = التيار المسبب للتسخين بالأمبير.

فإن ش س  $\alpha$  = م ت<sup>٢</sup>

أى أن ش =  $\frac{م ت^2}{\alpha س}$  = ك. ت<sup>٢</sup> وات / سم<sup>٢</sup>

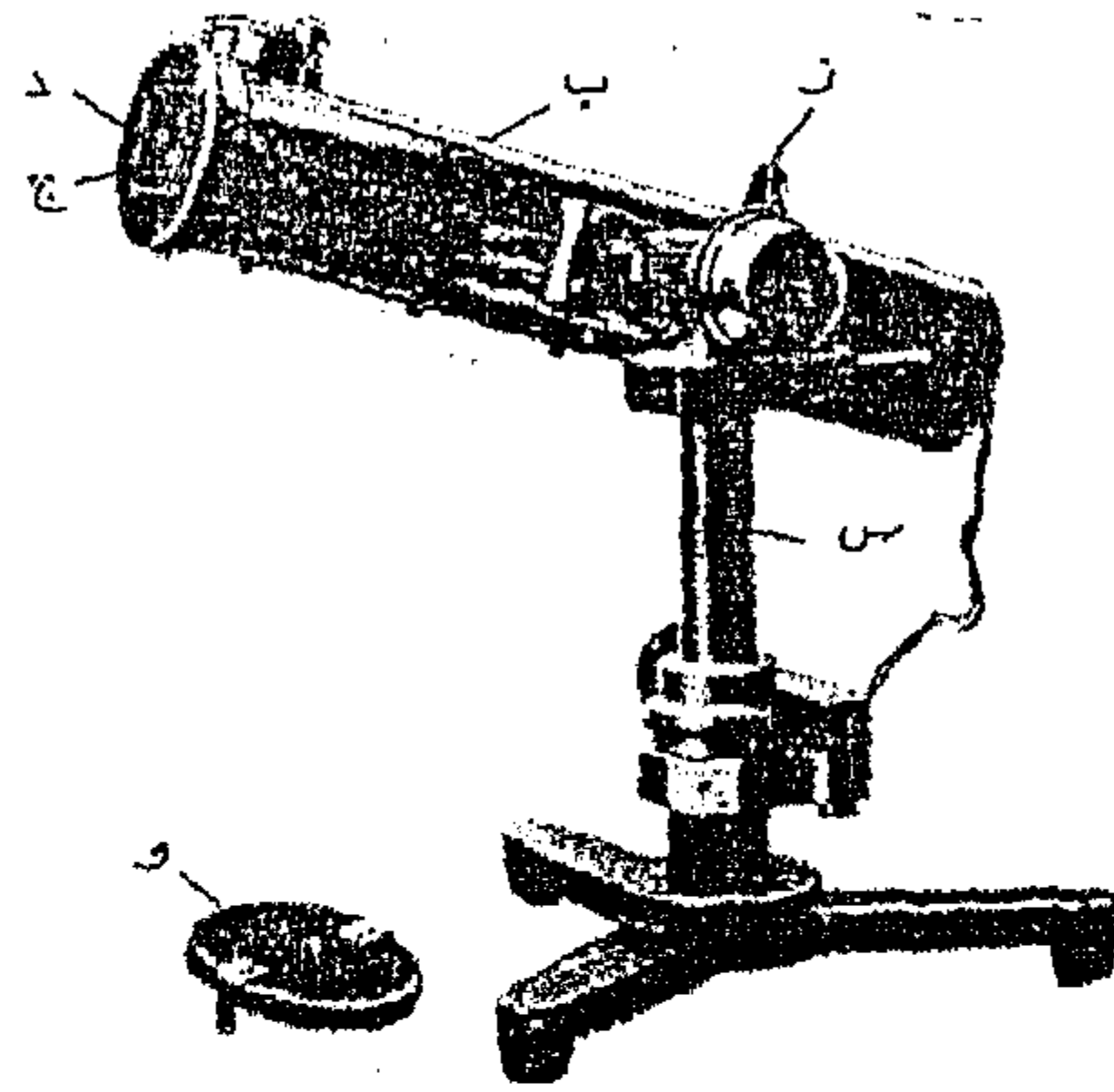
حيث ك =  $\frac{م}{\alpha س}$  مقدار ثابت للجهاز، يمكن حسابه بدلالة المقاومة وطول الشريحة وعرضها ومعامل امتصاصها.

على أية حال، نادراً ما يحدد الثابت من الناحية العملية بهذه القياسات، نظراً لعدم تماثل الشرائح أساساً وللفرق الطفيف في أسلوب تسخينها. لذا يحدد ثابت الجهاز في الواقع بمقارنته بأجهزة معيارية أخرى ذات ثابت يمكن نسبته إلى مجموعة المعايير القياسية المحفوظة لدى مركز قياسات الإشعاع العالمى بسويسرا

.World Radiation Centre

## وصف الجهاز:

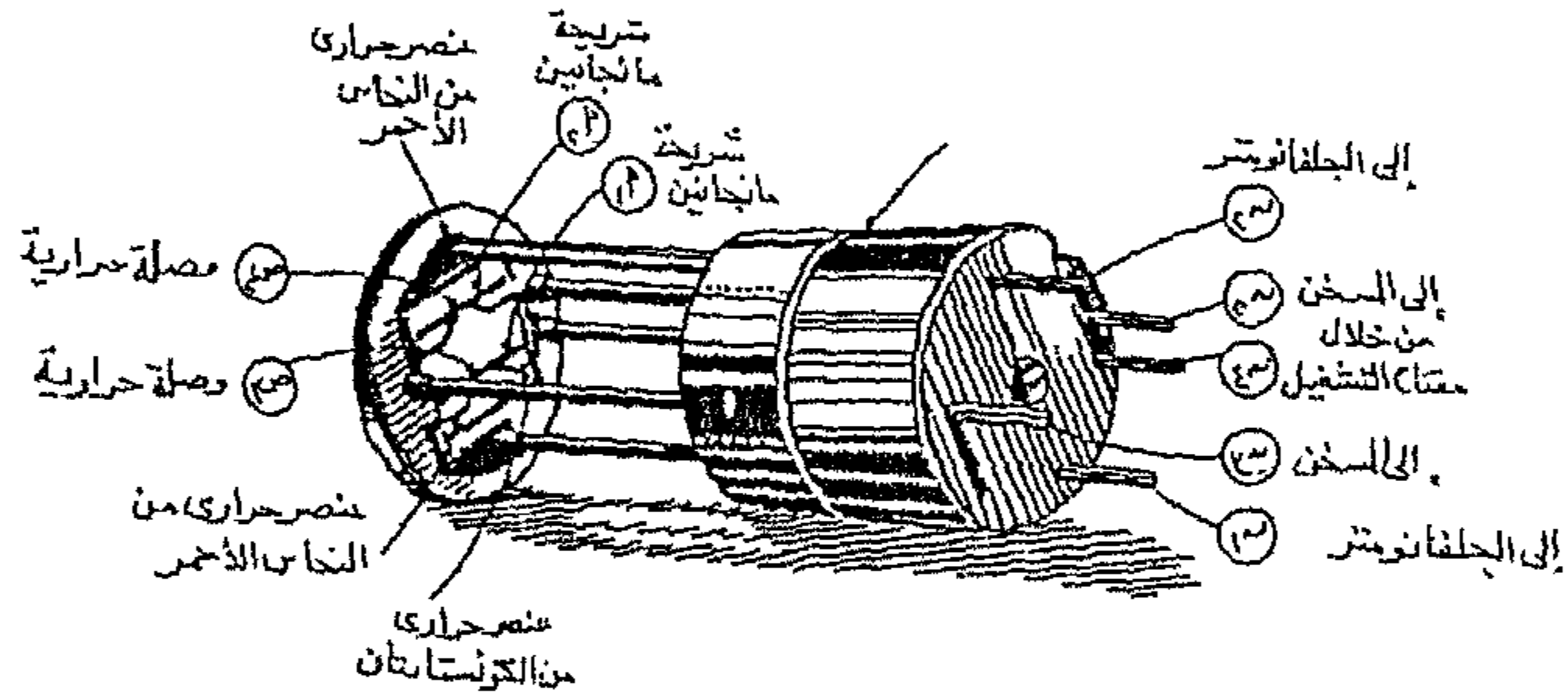
يوضح شكلاً (٣ - ٦)، (٣ - ٧) تفاصيل تركيب الجهاز، حيث يتكون البير هليومتر أساساً من شريحتين رقيقتين متمثلتين من مادة المانجانين Manganin (\*) (أ، ب)، ومركبتين بنفس الكيفية ومطليتين بمادة سوداء خاصة ذات امتصاصية عالية للغاية، وتتعرض أحدهما للإشعاع الشمسي في حين تعزل الأخرى عن الإشعاع ويتم تسخينها كهربياً إلى نفس درجة حرارة الشريحة المعرضة، وتبلغ أبعاد الشريحتين ٠,٠٢ مم سمكاً، ٢ مم عرضاً، ٢٠ مم طولاً، ومثبت على سطحيهما السفليين وصلتان حراريتان ص ١، ص ٢ من مادتي النحاس الأحمر والكونستانتان (\*\*) وإن كانت الوصلتان معزولتين كهربياً عن الشريحتين، والشريحتان مركبتان جنباً إلى جنب في أسفل أنبوبة مطلية بالنيكل (ب) تحتوى على عدة أغشية قرصية diaphragms. وتضمن هذه الأغشية ألا يقيس الجهاز إلا الإشعاع من الشمس ومن حلقة دائرية ضيقة من السماء محيطة بها، وأبعاد فتحة الجهاز المستطيلة تبلغ ٦ x ٣ .



شكل (٣-٦)

جهاز بير هليومتر أنجستروم

(\*) المانجانين Manganin: سبيكة من المنجنيز والنحاس والنيكل (المترجم)  
(\*\*) الكونستانتان Constantan: سبيكة مقاومة من النحاس والنيكل (المترجم)



شكل (٣ - ٧)

#### تفصيل مكونات جهاز بير هليومتر لأنجستروم

وفى واجهة الأنبوبة (ب) هذه توجد الفتحة المستطيلة (ج) وكذلك غطاء غالق Shutter (د)، يسمح للإشعاع بأن يسقط بالتناوب على الشريحتين، والأنبوبة ككل مثبتة بإحكام على هيكل ثلاثى جاسئ (س) مزود بجريدة مسننة وترس مسنن، بما يتيح للجهاز أن يدور فى كلا الاتجاهين السمتى والعمودى، ويمكن توجيه البير هليومتر بمنتهى الدقة بحيث يواجه الشمس وذلك بضبط الجريدة والترس المسننين أفقياً ورأسياً، إلى أن تقع صورة الشمس على علامة محددة على جهاز الديوبتر (ز)، ويستخدم الغطاء (و) فى إبقاء الفتحة الأمامية مغطاة ومن ثم فى حماية السطح الحساس فى حالة عدم استعمال الجهاز.

ويحمل طرف الأنبوبة (ب) الأسفل خمس نهايات طرفية (شكل ٣ - ٧) وتتصل النهايتان ن<sup>١</sup>، ن<sup>٢</sup> بالنهايتين الحررتين للجزء النحاسى من الازدواج الحرارى، فى حين يتصل الطرف ن<sup>٣</sup> بقطعة من النحاس الأصفر تصل ما بين شريحتى المانجانين فى إحدى الطرفين وبالنهايتين ن<sup>٤</sup>، ن<sup>٥</sup> فى الطرف الآخر من الشريحتين، وتستخدم النهايات ن<sup>٣</sup>، ن<sup>٤</sup>، ن<sup>٥</sup> فى توصيل الشريحتين أ<sup>١</sup>، أ<sup>٢</sup> بدائرة التيار الكهربى الذى يقوم بالتسخين، فيمر التيار خلال الشريحة أ<sup>١</sup> عند توصيل

النهائيتين ن ٣، ن ٤ بدائرة التسخين، وخلال الشريحة أ ٢ عند التوصيل بالنهائيتين ن ٢ ن ٥، وهناك ناقل للتحويل للدائرة الخارجية لتوصيل إمان ٤؛ أو ن ٥ بدائرة التسخين.

### التشغيل اليدوي لبير هليومتر أنجستروم مع منظومة قراءة البيانات خارجياً:

خذ البير هليومتر خارج المبنى وثبته على سطح أفقى ووجهه صوب أشعة الشمس مباشرة بالاستعانة بنظامى الضبط الأفقى والعمودى إلى أن تقع صورة الشمس على العلامة التى على الشاشة مع مراعاة الاحتفاظ بمنظومة لوحة قراءة البيانات (شكل ٣ - ٨) فى مكان ظليل.

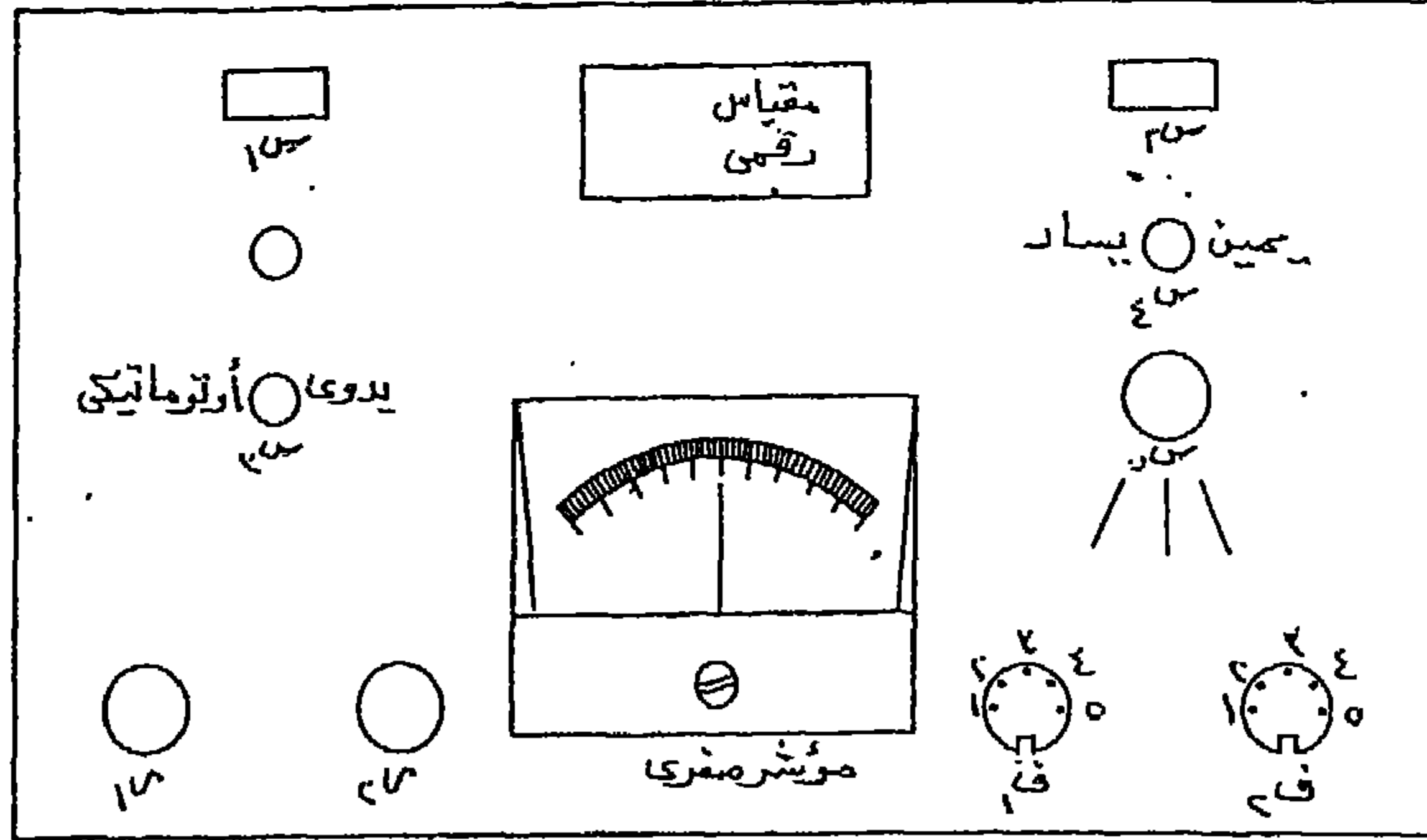
النهايات الخمس المتصلة بأطراف البير هليومتر والملحومة فى النهاية الأخرى إلى موفق أو وصلة التوليف adaptor ذى خمسة بنوز متلائمة مع خمس فتحات موجودة بلوحة قراءة البيانات، والآن أدخل المهائى أو الموفق فى الفتحة أو المقبس (ف١) أو (ف٢) وارفع الغطاء الأمامى لأنبوبة البير هليومتر وأدر غطاء الغالق حتى وضع المنتصف بحيث يقع إشعاع الشمس على كلا الشريحتين.

صل منظومة قراءة البيانات إلى مصدر التشغيل، شغل المفتاح رقم س ١، ومع الاحتفاظ بمفتاح تيار المقارنة س ٢ فى وضع الإغلاق صل المفتاح س ٥ بالبنز ب ١ وصل المفتاح س ٣ بوضع التشغيل اليدوى.

قد يبين المؤشر خطأ صفرياً، أى انحرافاً عن وضع الصفر الذى فى المنتصف، أعد ضبط البير هليوميتر على خط مستقيم نحو الشمس، وبالاستعانة بجهاز قياس فرق الجهد ر ١ أضبط المؤشر على وضع الصفر.

والآن حرك غالق البير هليومتر بمقدار ٩٠° ناحية اليسار، وفى ذات الوقت حرك المفتاح س ١ إلى اليسار، وشغل مفتاح تيار المقارنة س ٢، سيسرى الآن تيار عبر الشريحة اليسرى، اضبط قيمة التيار بمساعدة الريوستات (المقاومة الكهربائية

المتغيرة) ر٢ بحيث يشير مؤشر الانحراف إلى الصفر، سجل قراءة العداد الرقمي الذي يشير إلى قيمة الملقى أمبير ولنسمها ت١، سجل التوقيت القياسي بالمكان لأقرب دقيقة.



شكل ( ٣ - ٨ )

لوحة بيانات البيرهليومتر

حرك غطاء الغلق بمقدار ١٨٠°، بحيث تحجب الشريحة اليمنى عن الشمس، وفي ذات الوقت حرك المفتاح س؛ إلى جهة اليمين، أضبط الريوستات ر٢ إلى وضع الصفر للمؤشر واقراء العداد الرقمي، ولتكن قراءته ت٢.

ويتعين أن تتجه أنبوبة البيرهليومتر في أثناء القياسات دائماً نحو الشمس.

حرك الغطاء الخالق مرة أخرى ١٨٠° بحيث تحجب الشريحة اليسرى ثانية عن الشمس وحرك المفتاح س؛ إلى اليسار بحيث يمر التسخين عبر الشريحة اليسرى، اضبط القراءة - عن طريق الريوستات ر٢ - على الصفر وسجل قيمة التيار ت٣.



من واقع القيم ت<sub>١</sub>، ت<sub>٢</sub>، ت<sub>٣</sub>، تحسب شدة الإشعاع الشمسي من الصيغة:

$$\text{التيار المتوسط ت} = 1/4 (ت_1 + ت_2 + ت_3).$$

عند ضرب مربع هذه القيمة <sup>٢</sup> بالأمبير بـ ثابت الأداة (ك) (\*) نحصل على ش، شدة الإشعاع الشمسي المباشر مقدراً بالسعر لكل سم<sup>٢</sup> لكل دقيقة أو بالوات/سم<sup>٢</sup>، اعتماداً على ما إذا كان الثابت ك مقدراً بوحدات سعر / سم<sup>٢</sup> دقيقة، أمبير<sup>٢</sup> أم بالوات / سم<sup>٢</sup>. أمبير<sup>٢</sup>.

ينبغي ألا يفصل البير هليومتر من المقبس ف<sub>١</sub> إلا بعد غلق مفتاح التوصيل بالمصدر س<sub>١</sub>. قبل إعادة نظام القراءة ضع المفاتيح س<sub>٢</sub>، س<sub>٣</sub> في وضع الإغلاق.

### التشغيل التلقائي لنظام القراءة:

باتباع نفس الخطوات التي اتبعت في حالة التشغيل اليدوي، حرك المفتاح س<sub>٣</sub> إلى وضع التشغيل التلقائي Auto، واضبط مؤشر العداد على الصفر.

أدر غطاء غلق البير هليومتر والمفتاح س<sub>٤</sub>؛ كليهما إلى اليسار، وشغل مفتاح تيار المقاومة س<sub>٢</sub>.

سيمر تيار المقارنة تلقائياً عبر الشريحة اليسرى وستعدل قيمته تلقائياً حتى تصل الشريحتان إلى نفس درجة الحرارة، وستظهر قيمة تيار المقارنة على العداد الرقمي، أدر غطاء الغلق إلى اليمين، وحرك المفتاح س<sub>٤</sub> في ذات الوقت إلى اليمين واقرأ قيمة تيار المقارنة على العداد، وبطريقة مماثلة خذ قراءة للشريحة اليسرى.

---

(\*) سبق الإشارة إلى أن هذا الثابت يعتمد على مقاومة الشريحة وأبعادها ومعامل امتصاصها (المترجم)

## جهاز البيرانومتر:

### قياس الإشعاع الشمسي الإجمالي الشامل:

يستعمل جهاز البيرانومتر في قياس الإشعاع الشامل الوافد من الشمس والسماء على سطح أفقي، ويتكون من سطح رقيق مطلي باللون الأسود، مثبت داخل غلاف سميك نسبياً ومصقول صقلاً جيداً، وعند تعرضه للإشعاع الشمسي ترتفع درجة حرارة السطح الأسود، إلى أن يتساوى معدل فقدانه للحرارة نتيجة الأسباب المختلفة، مع معدل اكتسابه للحرارة عن طريق الإشعاع، ويولد هذا الارتفاع في درجة الحرارة قوى دافعة كهربية يمكن قراءة مقدارها وتسجيلها بواسطة جهاز مللي فولتметр.

ويتركب السطح الحساس من ثرموبيل<sup>(\*)</sup> Thermopile دائري متعدد الوصلات على شكل سلك ملتف ومطلي باللاك<sup>(\*\*)</sup> الضوئي الأسود من نوع بارسون Parson، وتركب الوصلات الفعالة أو الساخنة على امتداد حلقة بالجهة العلوية من السطح الحساس، في حين تبقى الوصلات الخاملة أو الباردة في اتصال حراري جيد وإن كانت معزولة كهربياً عن قاعدة الجهاز الثقيلة نسبياً، وفرق درجات الحرارة ما بين الوصلات الساخنة والباردة، دالة في الإشعاع الساقط على السطح الحساس.

وبالصقل الجيد لكل من الغلاف السميك والسطح الخارجي، تظل درجة حرارة القاعدة الثقيلة منتظمة في حين يغطي السطح الحساس بقبتين زجاجيتين نصف كرويتين لهما نفس المركز، بما يكفل وقايته من الرياح والمطر، ويقلل من الميل لتكوين تيارات حمل.

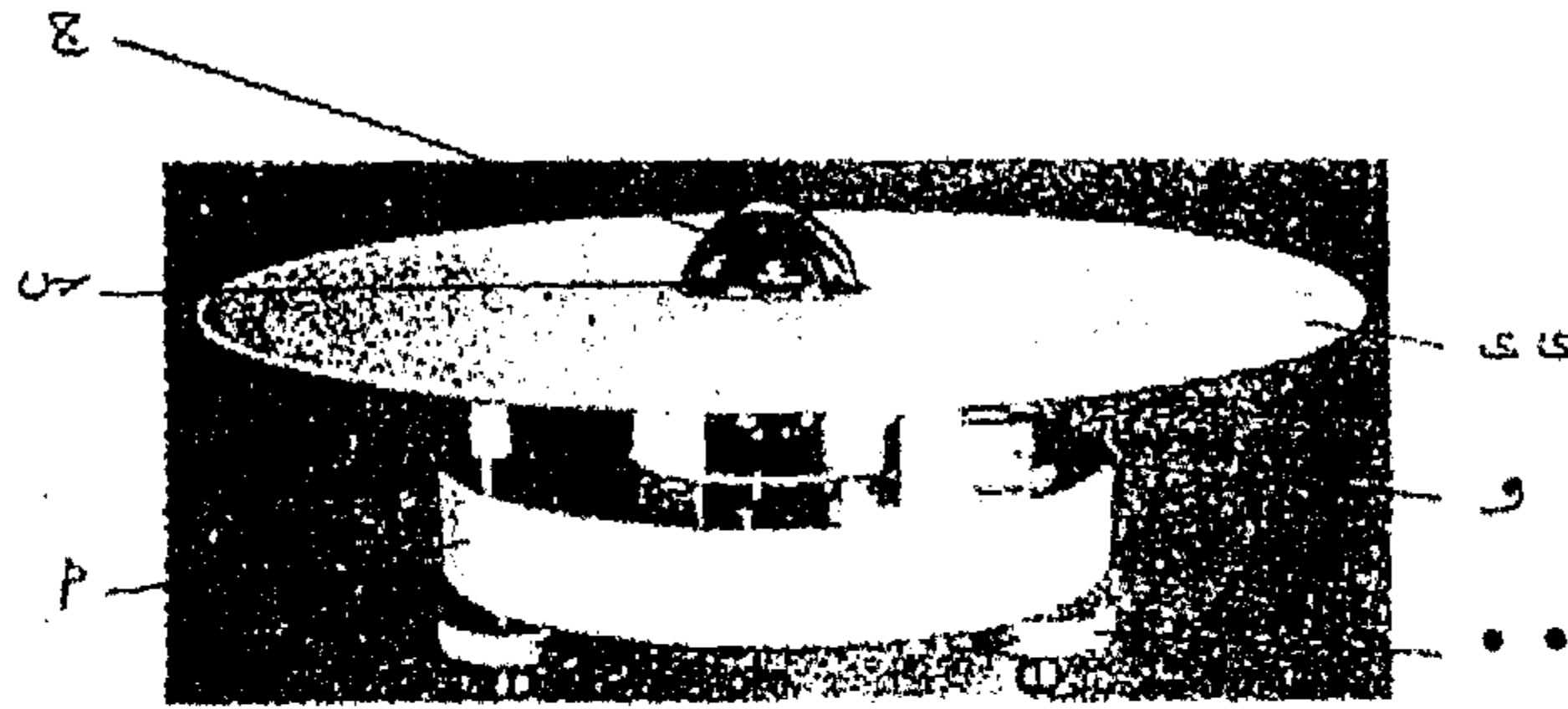
---

(\*) الثرموبيل Thermopile: جهاز لقياس تغير كمية الحرارة والتيار المتولد (المترجم)  
(\*\*) اللاك Lacquer: مادة طبيعية أو اصطناعية لصقل السطوح وإكسابها بريقاً عالياً (المترجم)

## وصف الجهاز:

### البيرانومتر:

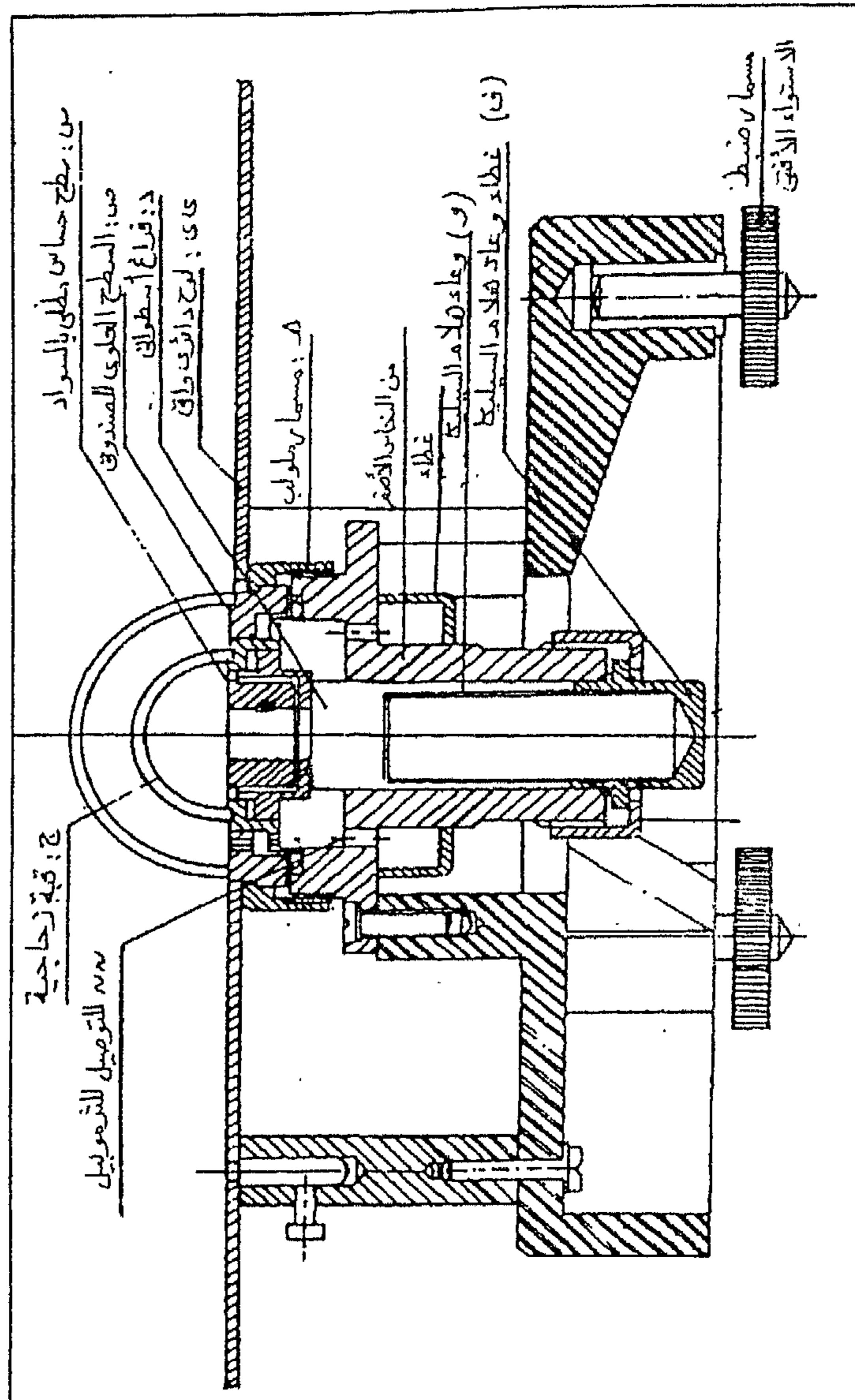
يبين الشكلان ( ٣ - ٩ ، ١٠ ) تفصيلات مكونات البيرانومتر، فالجزء (س) هو السطح الحساس المطلى بالسواد والذي تحميه قبتان زجاجيتان ذاتا مركز مشترك (ج) قطراهما ٣٠ ، ٥٠ ملليمترًا، والقبتان مصنوعتان من زجاج صوانى خاص ذى صفات ممتازة من حيث نقل الإشعاع الشمسى، والثرموبييل مركب داخل فراغ أسطوانى (د) داخل غطاء من النحاس الأصفر المصمت (أ)، ويخرج طرفا السلكين الكهربيين من الثرموبييل من خلال أنبوتين (ن ن) والغطاء (و)، والسطح العلوى لصندوق الجهاز (ص) بين القبتين الزجاجيتين مصقول صقلًا جيدًا للتقليل من امتصاص الإشعاع، وبقيّة أجزاء الجهاز محمية من الإشعاع المباشر بتركيبها عند مركز لوح دائرى واق (ى ى) قطره ٣٠ سم ومطلى بطلاء أبيض، والسطح العلوى للصفحة الواقية فى نفس مستوى سطح الثرموبييل المطلى بالسواد بالضبط، وعلى ذلك فإن درجة حرارة الصندوق تعادل درجة الهواء المحيط أو تقاربها، وهى أكثر تجانسًا مما لو تعرضت لإشعاع قوى أو ربما متذبذب.



شكل ( ٣ - ٩ )

البيرانومتر الكهروحرارى

و: ميزان تسوية كحولى	ج: قبة زجاجية
ب: مسمار لضبط الاستواء الأفقى	س: سطح حساس مطلى بالسواد
أ: غلاف من النحاس الأصفر	ى ى: لوح واق



شكل ( ٣ - ١٠ )

تفاصيل تركيب البيرانومتر الكهروحرارى

ويمكن ضبط منسوب السطح بدقة عن طريق ثلاثة مسامير ملولبة (ب) وعن طريق ميزان تسوية كحولى دائرى، ومن الممكن توصيل أجزاء البيرانومتر الداخلية بإناء محتو على مادة مجففة كالسيليكا الهلامية Silica gel مما يحفظ داخل الجهاز فى حالة جافة ويمنع تغيش الكرتين الزجاجيتين من الداخل من جراء تكثف الرطوبة، وتركب أطراف الوصلات الكهربائية - معزولة عن الهواء - داخل الأنبوبتين ن ن ورأس المسمار الملولب ه ه، وفوق حشو من حلقة مطاطية مما يجعل الغرفة (د) بمجملها معزولة جيداً عن الهواء.

### جهاز التسجيل:

يستعمل جهاز قياس فرق الجهد فى تسجيل قراءة البيرانومتر، ويتراوح مدى المسجل بين ٠، ١٠ مللى فولت ويبلغ عرض ورقة تسجيل الرسم البيانى ١٦٠مم ومعدل حركتها المعتادة ٢٠ مم لكل ساعة.

### اختيار الموقع:

#### جهاز البيرانومتر:

من الأهمية بمكان تركيب البيرانومتر فى مكان مفتوح، وفى وضعية لا يكون هناك معها حائل يعترض أشعة الشمس على تعاقب الفصول وما بين وقت شروق الشمس وغروبها، ومن الأفضل ألا يحول حائل بين الجهاز وبين السماء حتى خط الأفق فى جميع الاتجاهات، ويتعين الاهتمام على نحو خاص، بالألا يزيد ارتفاع أى حائل ما بين الشمال الشرقى والجنوب الشرقى، وبين الشمال الغربى والجنوب الغربى عن ٣ درجات، وأفضل بديل لتحقيق ذلك هو منصة ملائمة أو عمود مناسب ينصب على سطح علوى مستو لمبنى لا توجد حوله عوائق فى شكل أشجار أو بنايات مرتفعة تحجب الإشعاع الآتى من أى قسم من السماء، ومع هذا الانتقاء لأفضل المواقع يجب مراعاة اختبار الجهاز وضبطه على فترات مناسبة.

## جهاز التسجيل:

ينبغي أن يركب جهاز التسجيل فى حجرة أو على جدار أو منصدة بعيداً عن أى مصدر لاهتزازات ملموسة، وأن يحمى من الزيت والماء والغازات المسببة للتآكل الكيميائى وما إلى ذلك وأن يحتفظ به بعيداً - ما أمكن - عن الغبار، ويجب ألا تسلط الشمس عليه مباشرة فى أى وقت ولا أن يوضع على مقربة من محركات أو محولات كهربائية مما يولد مجالات كهرومغناطيسية ضخمة تتداخل معه، كما يتعين الاحتفاظ به بعيداً عن المشعات أو المصادر الحرارية المختلفة، كما ينبغي الحفاظ على درجة حرارة الحجرة فى حدود ٢٠ - ٣٠ م، ويجب تحاشى الغرف التى تتعرض لتباين شديد فى درجة الحرارة على مدار اليوم، ويتعين توافر مصدر كهربائى أحادى الطور (٢٢٠ فولتاً) قرب المسجل.

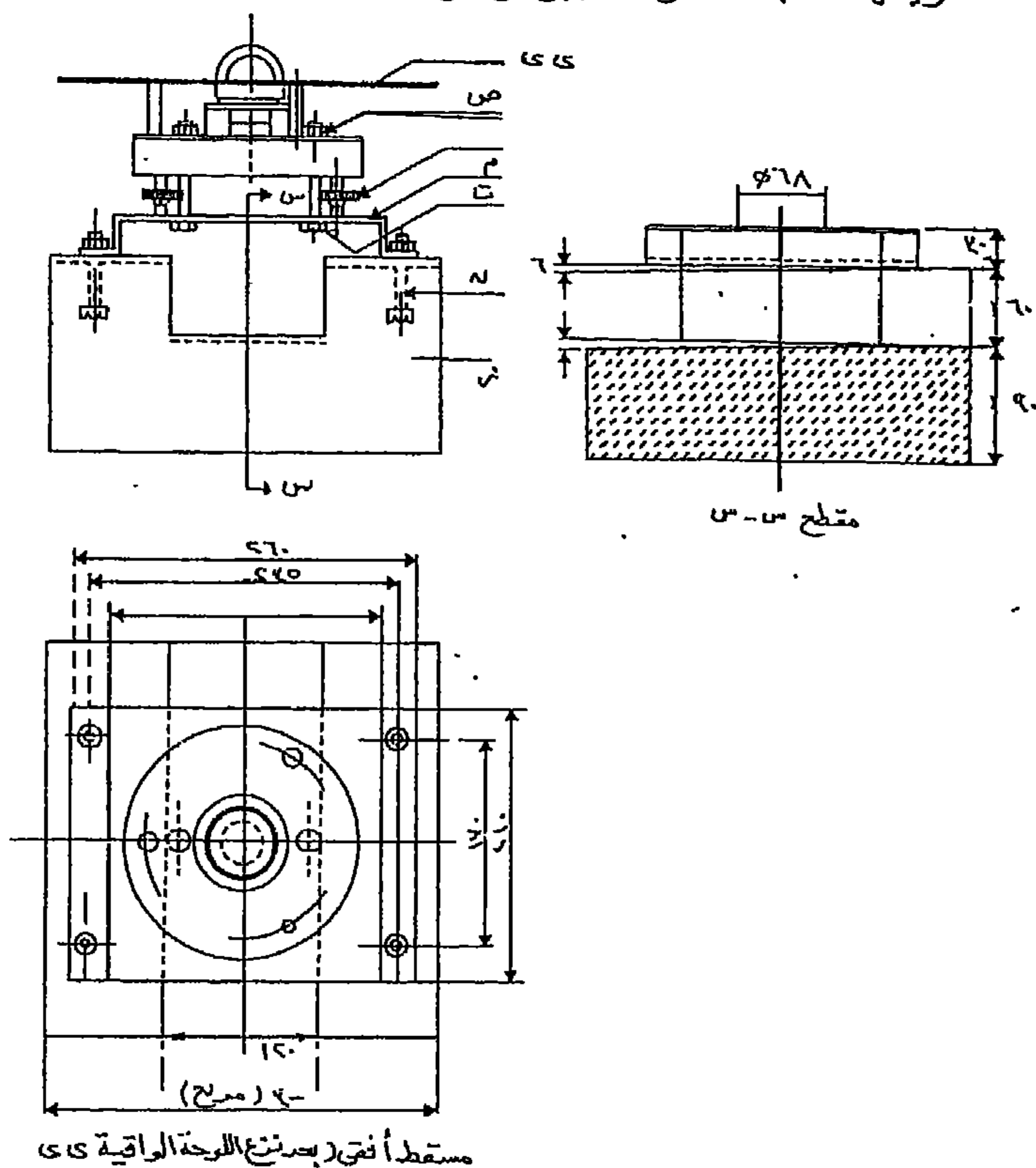
## التركيب:

### جهاز البيرانومتر:

تلزم لتركيب البيرانومتر منصة أفقية (ز) مربعة (٣٠ x ٣٠ سم) بارتفاع ١٥ سم وذات فجوة داخلية (شكل ٣ - ١١)، وذات جيوب بالقاعدة الخرسانية يمكن أن تستوعب أربعة مسامير رأسية (ن)، ويجب السماح بإمكانية إمالة كافية للمنصة العليا فى جميع الاتجاهات حتى يمكن تلافى تراكم مياه الأمطار عليها، وينبغي أن تستعمل صفيحة التركيب (م) التى تورد مع الجهاز كنموذج أو قالب لتثبيت المسامير فى المنصة، وبعد تجصيص مسامير القاعدة الخرسانية الأربعة فى مكانها المخصص كما بالشكل يتم تركيب البيرانومتر وفقاً للخطوات التالية:

أ) طرفاً نهايتى البيرانومتر مغلفان داخل جراب بلاستيكى، صل الطرفين أولاً إلى ناحية من وصلة الخزف الصينى (البورسلين) (شكل ٣ - ١٢)، وصل الناحية الأخرى من الوصلة إلى الكوابل التى تصل لجهاز التسجيل، اعزل الوصلات بشمع البارافين أو أية مادة أخرى جيدة العزل عن ظروف الطقس، ضع الوصلة تحت قاعدة الجهاز.

ب) ضع البير انومتر - بالحرص اللازم - على صفيحة التركيب (م) (شكل ٣ - ١١)، وثبت المسمارين (ت) من النحاس الأصفر من أسفل، ضع الصواميل (ص) في مكانها، مع عدم إحكام ربطها للنهاية بحيث يمكن تحريكها لضبط استواء البير انومتر فيما بعد.



شكل ( ٣ - ١١ )

تثبيت البير انومتر (الأبعاد بالمليمتر)

- |   |                   |
|---|-------------------|
| ب: مسمل ضبط الاستواء الأفقى                             | س: اللوحة الواقية |
| م: لوحة التركيب   | ن: مسامير الأساس  |
| ت: مسامير من النحاس الأصفر (١٠ مم قطرًا x ١٠٠ مم طولاً) | ز: المنصة         |
| ص: صواميل من النحاس الأصفر                              |                   |

ج) ضع هلام سليكا جديداً (أو معاداً تنشيطه) فى الوعاء (و) ( شكل ٣ - ١٠)، وتأكد من إحكام غلق الغطاء (ف) فوق الوردة المطاطية، وثبت المسمار الملولب (هـ) من أسفل.

د) ضع صفيحة التركيب والبيرانونومتر على مسامير الخرسانة الأربعة ن، وأحكم الرباط على الصواميل، أدر لولاب ضبط استواء البيرانونومتر حتى يوضح ميزان التسوية الكحولى الدائرى تمام الاستواء بحيث تكون قاعدة الجهاز (وبالتالى سطح الثرموبيل الحساس) فى وضع أفقى تماماً، أحكم الآن ربط الصواميل ص، مع الاحتفاظ برأس المسمار (ت) بمفتاح الربط.

هـ) ضع صفيحة الحفظ الدائرية ى ى فى موضعها واربطها لولبياً إلى الأعمدة الثلاثة الحاملة لحماية كافة أجزاء الجهاز - فيما عدا الثرموبيل - من الإشعاع المباشر، ولكى تعزل أى إشعاع غير مرغوب فيه من أسفل المستوى الأفقى، وبذلك يكون البيرانونومتر معداً للتسجيل.

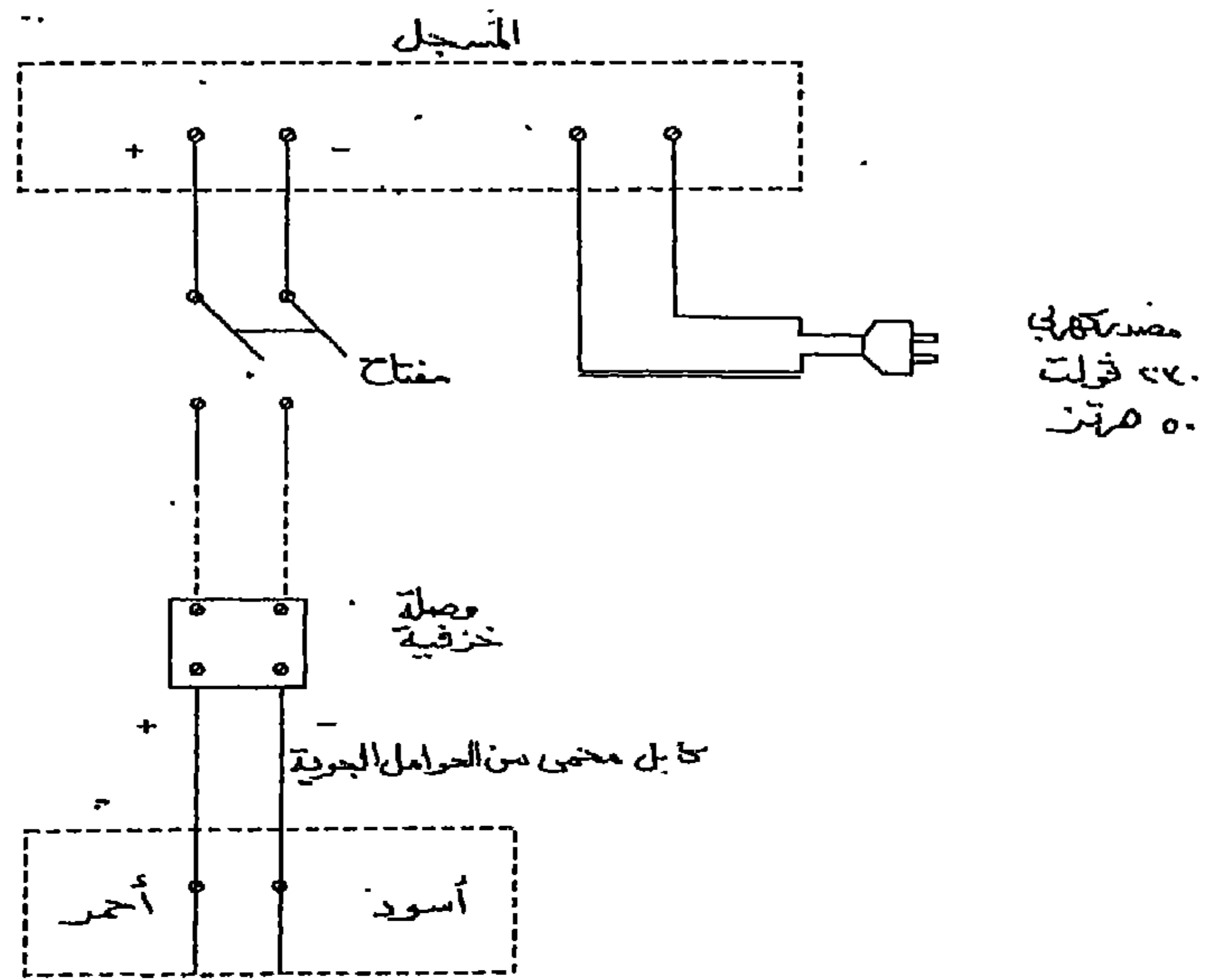
### المسجل:

يصمم جهاز التسجيل بحيث يركب على طاولة (أ) مختلفاً داخل الحائط، إلا أن الأفضل تركيبه على جدار على ارتفاع حوالى ١,٣ م ليتيسر تشغيله.

وتفصيلات التوصيلات الكهربائية يوضحها (شكل ٣ - ١٢) فيوصل البيرانونومتر - عبر موصل موضوع فى قاعدة الجهاز، وزوج من الكوابل المحمية من العوامل الجوية لهما طول مناسب من نوع (٣ / ٠,٠٢٩) إلى الصندوق الطرفى فى مؤخرة جهاز التسجيل من خلال مفتاح تشغيل يسمح بفصل الجهاز عن المسجل إذا لزم الأمر فى أى وقت.



وليس المسافة بين المسجل والبيرانومتر بذات أهمية من الناحية الكهربائية، إلا أن خفض تكاليف الإنشاء يقتضى أن يكون المسجل أقرب ما يمكن إلى البيرانومتر قدر ما تسمح الظروف العملية، ويتعين أن تمت التوصيلات الكهربائية بعناية فائقة، بحد أدنى من الوصلات العارية المكشوفة، ومن الأهمية بمكان حماية الأسلاك من الرطوبة، ولأجل ذلك يتعين أن يركب السلك المعزول عن الظروف الجوية بحيث لا تتركز أية أفعال لا فوق وصلة البورسلين ولا فوق مفتاح التشغيل الثنائى، وتكون أطراف البيرانومتر قد سبق توصيلها بموصل البورسلين فى وقت التركيب، يؤخذ جزء ذو طول مناسب من الكابل المزدوج من موصل البورسلين ويوصل بمفتاح التشغيل، الذى قد يكون مثبتاً على نفس اللوحة التى ركب عليها المسجل، والآن صل مفتاح التشغيل بنهايتى طرف المسجل كما هو مبين بشكل ( ٣ - ١٢ ) مع مراعاة القطبية السليمة (الأحمر بالطرف الموجب والأسود بالطرف السالب).



شكل ( ٣ - ١٢ )

التوصيلات الكهربائية

## المقادير الثابتة الخاصة بالجهاز:

يزود البيرانومتر بشهادة معايرة تبين مردود البيرانومتر بالملى فولت /  
سعر / م ٢ دقيقة وبالميكروفولت / مللى وات / سم ٢، فعلى سبيل المثال إذا كان  
معامل المعايرة لجهاز ما = ٤,٥ مللى فولت / سعر / م ٢ / ق أو ٦٤,٦  
ميكروفولت / مللى وات / سم ٢، فإن لوحة بيان الانحراف الكلى (وهى مقسمة إلى  
١٠٠ قسم) للمسجل وتناظر ١٠ مللى فولت، ستناظر ٢,٢٢ سعر / سم ٢ / دقيقة  
أو ١٥٥ مللى وات / سم ٢، وستناظر الخانة الواحدة من خريطة البيان مقدار  
٠,٠٢٢٢ سعر / سم ٢، دقيقة أو ١,٥٥ مللى وات / سم ٢.

## التشغيل:

كلا البيرانومتر والمسجل جهاز حساس يتعين التعامل معه بكل عناية، فلا بد  
- بداية - من دراسة الجهاز بدقة والتعرف على كل الأجزاء المكونة له جيداً،  
ويراعى الاحتفاظ بباب المسجل مغلقاً ومؤمناً دوماً، فيما عدا أوقات تغيير خرائط  
البيان وما إلى ذلك، ويجب توقيع علامات توقيتية مرتين يومياً طبقاً للتوقيت  
الظاهرى المحلى (فى الساعة ١٠٠٠ والساعة ١٦٠٠ مثلاً)، مع فاصل زمنى قدره  
٥ - ٦ ساعات بين العلامتين، وذلك بالضغط على زر إعادة العداد للصفر،  
وينبغى تسجيل توقيت العلامتين على خريطة البيان ذاتها.

## الصيانة:

لابد من إجراء الصيانة لكل من البيرانومتر والمسجل بكل عناية ودقة فى  
ظروف من النظافة التامة، نظف كلا الجهازين يومياً، بمسح الزجاجتين للبيرانومتر  
بقطعة قماش ناعمة، إذ أن أى غبار أو قاذورات أو مياه عليهما سيدخل عنصراً  
من عدم التأكد على البيانات المسجلة.

ينبغي أن يختبر البيرانومتر من وقت إلى آخر عدة مرات في اليوم الواحد، وبصفة خاصة في أعقاب هطول المطر، ولابد من تجفيف زجاج القبتين بقطعة قماش جافة وناعمة بعد المطر أو الضباب وصقله بقطعة من الموسلين الناعم، ويجب كذلك التأكد من استقرار القبتين الزجاجيتين في مكانهما وثبیتهما إذا لزم الأمر.

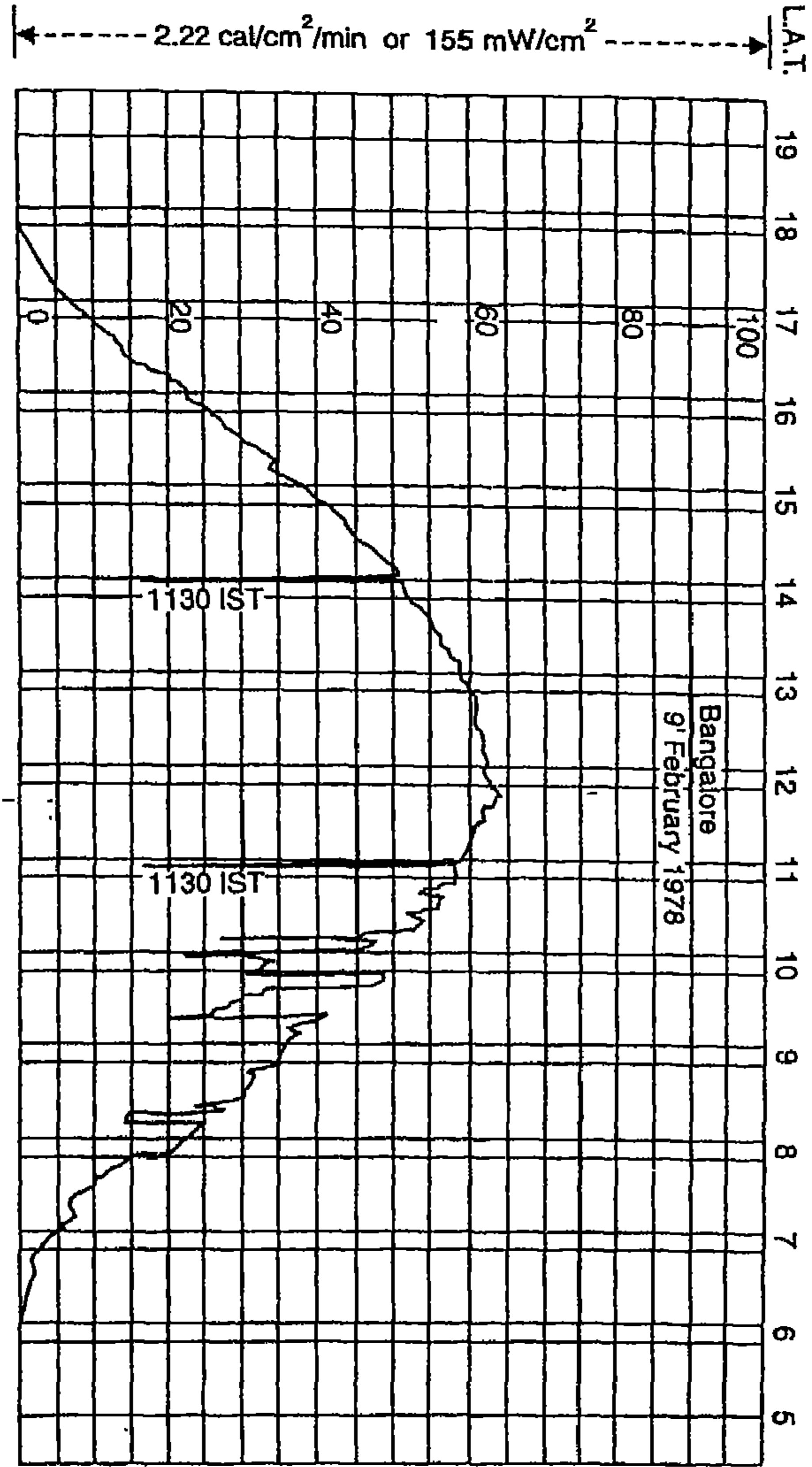
يجب فحص هلام السليكا كل أسبوع والاستبدال به، وذلك لتجنب تلف الوصلات الحرارية بفعل الرطوبة وتجنب أى تكثف فى الهواء الفاصل بين القبتين، فمن شأن ذلك أن يحدث عدم تأكد فى التسجيلات المتحصل عليها، وهلام السليكا المحتوى على كلوريد الكوبالت كمؤشر (فهو أزرق اللون وهو جاف، وذو لون وردى وهو مبلل) هو المستعمل كمادة مجففة مع الإناء من النحاس الأصفر (و) فى شكل (٣ - ١٠)، وبالإمكان رفع المجفف من الوعاء بفك قلاووظ (برغى) الغطاء ورفع الوعاء من الأنبوبة، ويجب إعادة تنشيط هلام السليكا كلما لوحظ تكاثف على زجاج القبتين وتحول الهلام إلى اللون الوردى، ولإعادة تنشيط مادة التجفيف تسخن بهدوء على موقد أو تحت مصباح كهربائى قدرة ١٠٠ وات إلى أن تستعيد المادة لونها الأزرق، أى إلى أن تزول منها الرطوبة، ويستمر فى قلب الهلام لضمان انتظام تسخينه مع مراعاة عدم المغالة فى التسخين أكثر من اللازم، وبعد ذلك تترك لتبرد فى الإناء المحكم غير المنفذ للهواء الذى وردت فيه، والذى يتعين أن يبقى مغلقاً إبان التبريد، وبعد أن تبرد ترفع المادة المجففة التى أعيد تنشيطها وتنقل مباشرة إلى الوعاء. ولابد من مراعاة أنه كلما زاد تكرار تعرض المادة المجففة للهواء الرطب زادت الحاجة إلى تكرار عملية إعادة تنشيطها. ويجب أن يحتفظ بالوعاء محكم الغلق دوماً قدر الإمكان وأن تبدل حلقة الوعاء المطاطية كلما دعت الحاجة لذلك، كما ينبغي تعريض المجفف لمدة طويلة للهواء الخارجى قبل الاستعمال!

اختبر مجموعة الأسلاك كل ستة أشهر، أو على الفور إذا ما ارتببت في وقوع خطأ ما. افصل الكابل عن مفتاح تشغيل المسجل وعن الموصل الخزفي. ومع الاحتفاظ بالنهايتين منفصلتين، قس مقاومة العازل بين السلكين، إذ يتعين أن تزيد القراءات كثيرا عن ١٠ ميغا أو م، ويستعمل لهذا الغرض مقياس مقاومة لمولد ذي فرق جهد عال. وينبغي عندئذ توصيل القلبين معا عند نهاية البيرانومتر وقياس المقاومة بين القلبين عند المسجل. ويجب أن تتساوى المقاومة مع المقاومة المحسوبة للكابل وفي حدود فرق ضيق لا يزيد عن  $\pm 2\%$ .

تأكد من العزل المحكم لوصلات الكابل إلى الموصل الخزفي بشمع البارافين بعد توصيل التوصيلات. ومن المستحسن اختبار معايرة البيرانومتر على فترات منتظمة.

### تسجيل النتائج في صورة جداول:

يحسن جدولة النتائج بالسرعة الممكنة بمجرد رفع الخريطة البيانية من المسجل. ويتعين حساب كمية الإشعاع كل ساعة وكذلك كميته اليومية الإجمالية من التسجيلات المتحصل عليها معبرا عنه بالسعر / سم ٢ لكل ساعة ولليوم ككل. ويمثل شكل (٣-١٣) عينة من الرسم البياني لبيرانومتر. والخطوط المبينة للساعات تناظر الوقت الظاهري المحلي، ومدى الانحراف الكلي المقسم إلى ١٠٠ قسم يناظر ٢,٢٢ سعر / سم ٢. دقيقة أو ١٥٥ مللي وات / سم ٢ لهذا الجهاز ( ١ سعر / سم ٢. دقيقة = ٦٩,٧ مللي وات / سم ٢ ). ويعبر عن الوقت - في كل حسابات الإشعاع - بالتوقيت المحلي الظاهري. ورغم أن التوقيت الواقعي غير ذي بال في حسابات القيم الكلية للإشعاع على مدار اليوم، فلا بد من إعطاء سماح للفرق بين التوقيت القياسي للهند والتوقيت المحلي الظاهري عند حساب القيمة اللحظية للإشعاع، أو للإشعاع خلال ساعة.

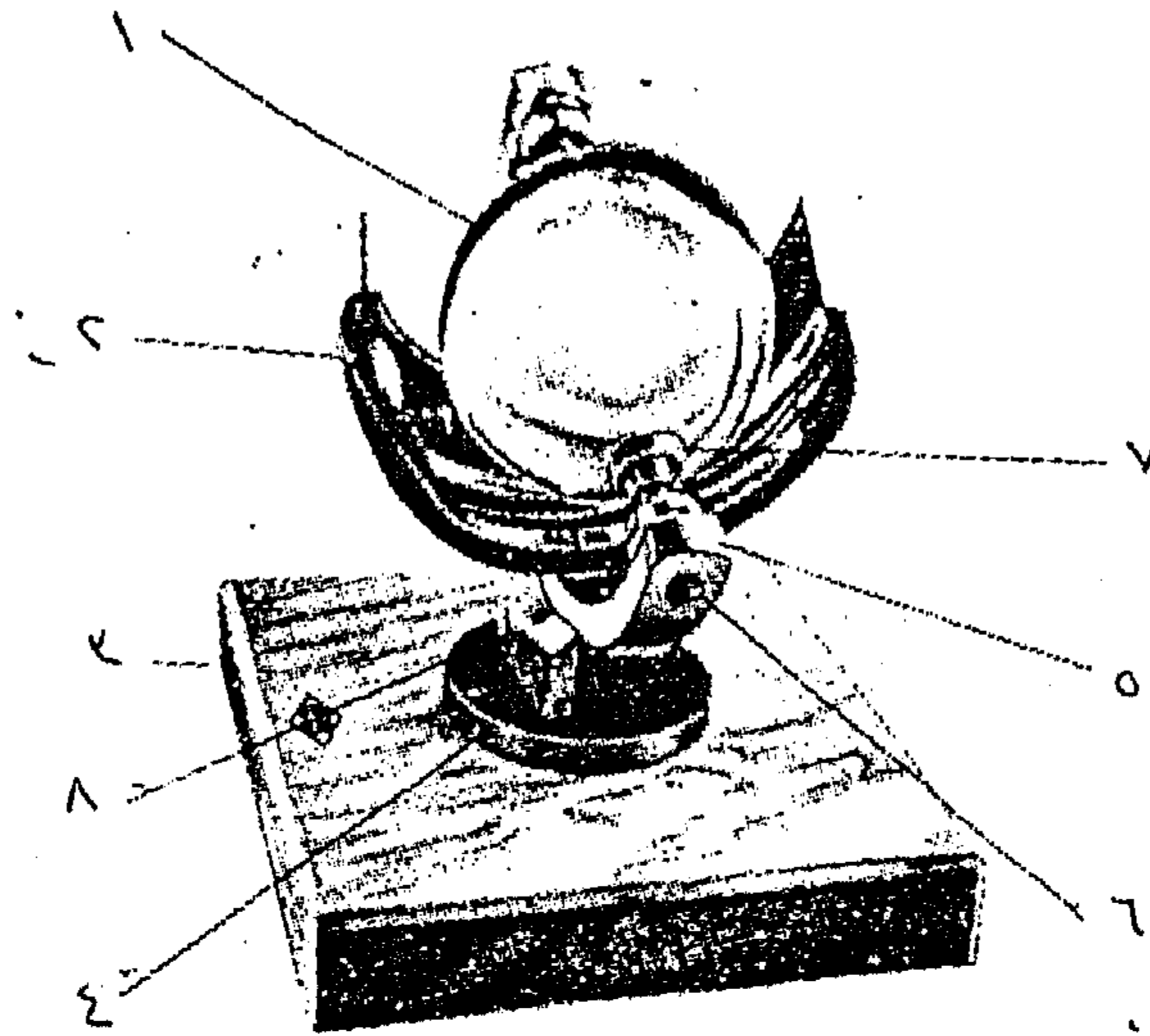


شكل (٣-١٣)

عينة من رسم بياني لبيرومتر

### مسجل سطوع (نورانية) الشمس:

يتركب جهاز تسجيل درجة سطوع الشمس ( شكل ٣-١٤ ) من كرة زجاجية (١) مركبة فى وعاء من النحاس الأصفر (٢) له أخاديد تودع فيها بطاقات التسجيل. وتترك الكرة أثرا على البطاقة عند تعرضها للشمس بحيث يدل طول هذا الأثر رأسا كمقياس على مدة سطوع الشمس. والمسجل مركب فوق قاعدة رخامية (٣)، والوعاء النحاسى مرتكز على قضيب شبه دائرى من النحاس الأصفر (٥) ودعامة (٤). والكرة مثبتة عند نهايتها بمسامير محوية من النحاس الأصفر تتوافق مع مجارٍ محفورة فى الكرة. وللوعاء (٢) ثلاث مجموعات من الشقوق لتستقبل ثلاث مجموعات من البطاقات، وهى إما بطاقات منحنية طويلة للرصد فى الصيف، أو بطاقات منحنية قصيرة فى الشتاء، أو بطاقات مستقيمة فى فترات الاعتدالين.



شكل (٣-١٤)

جهاز تسجيل درجة سطوع الشمس

## التركيب:

### اختيار الموقع:

عادة ما يركب جهاز تسجيل سطوع الشمس فوق سطح بناية، حيث لا توجد حوائل دون الشمس في أى وقت من ساعات النهار ولا في أى وقت من السنة. ويستلزم التعرض المستمر دون انقطاع للشمس أفقا حرا مفتوحا بين الشرق والشمال الشرقى، وبين الشرق والجنوب الشرقى ( على الجانب الشرقى )، وبين الغرب والشمال الغربى، وبين الغرب والجنوب الغربى ( من الجهة الغربية )، وهذه هي الحدود التقريبية لمواقع شروق الشمس وغروبها لدى خطوط العرض المارة بالهند. والنطاقات اللازمة أكثر اتساعا إلى حد ما في شمال شبه القارة الهندية عن جنوبها. ولا يسمح بوجود أى حائل جهة الجنوب يحول دون الشمس الساطعة خلال فترات أدنى ارتفاع لقرص الشمس في منتصف النهار في شهر ديسمبر. ويتحقق هذا الشرط إذا كانت علاقة المسافة بين الجسم وارتفاعه عن موقع مسجل سطوع الشمس تخضع للاعتبارات التالية:

عند خط عرض ٣٥° شمالا: المسافة = ضعف الارتفاع على الأقل.

عند خط عرض ما بين ١٠، ٢٠° شمالا: المسافة = الارتفاع على الأقل.

وهذه الأرقام نسب تقريبية وتطبق في حالة وجود الجسم إلى جهة الجنوب بالضبط من الجهاز. ولابد من زيادة النسبة ما بين المسافة والارتفاع بدرجة ملائمة إذا وقع الجسم ناحية الشرق أو الغرب من الجنوب الجغرافى. ويوضح شكل (٣-١٥) المعلومات الدقيقة لمتطلبات التعرض للشمس لدى خطوط العرض المختلفة بالهند، حيث يعطى الارتفاع والسمت الشمسى عند أزمنة السنة المختلفة ولدى خطوط العرض ما بين ٣٤° شمالا، مع ساعات النهار طبقا للتوقيت المحلى الظاهرى المرقم على المنحنيات. والمنحنيات أ، ب، ج، د، هـ، تناظر توقيتات العام المبينة فيما بعد:

الميل الشمسي

٢٢,٥ شمالا  
١١,٧٥ شمالا  
صفر  
١١,٧٥ جنوبا  
٢٣,٥ جنوبا

تاريخ اليوم

٢٢ يونيو  
٢١ إبريل، ٢٣ أغسطس  
٢١ مارس، ٢٣ سبتمبر  
١٨ فبراير، ٢٥ أكتوبر  
٢٢ ديسمبر

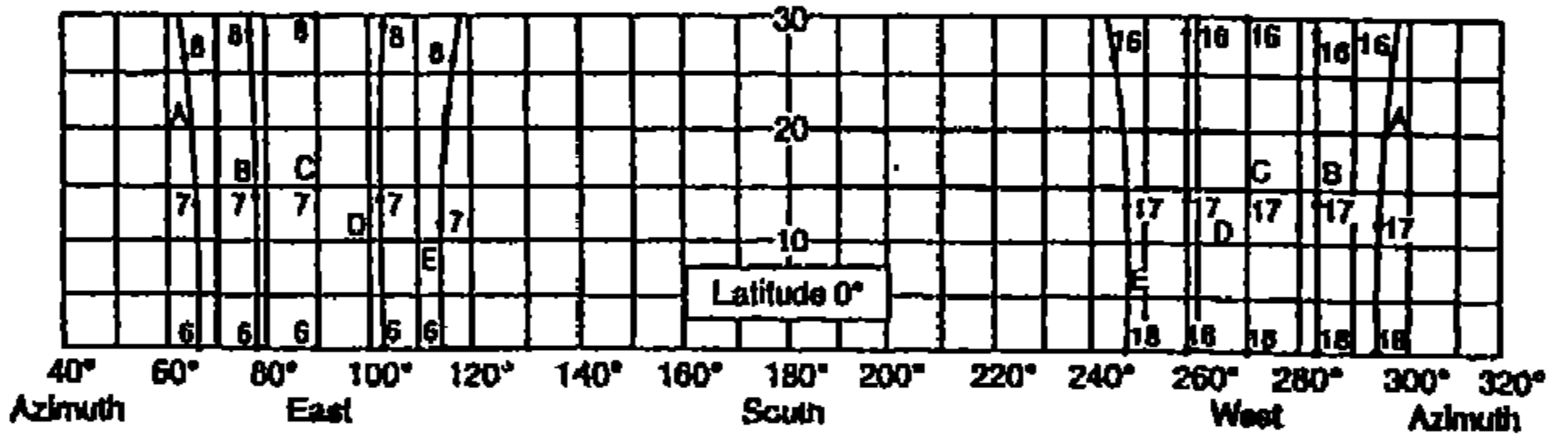
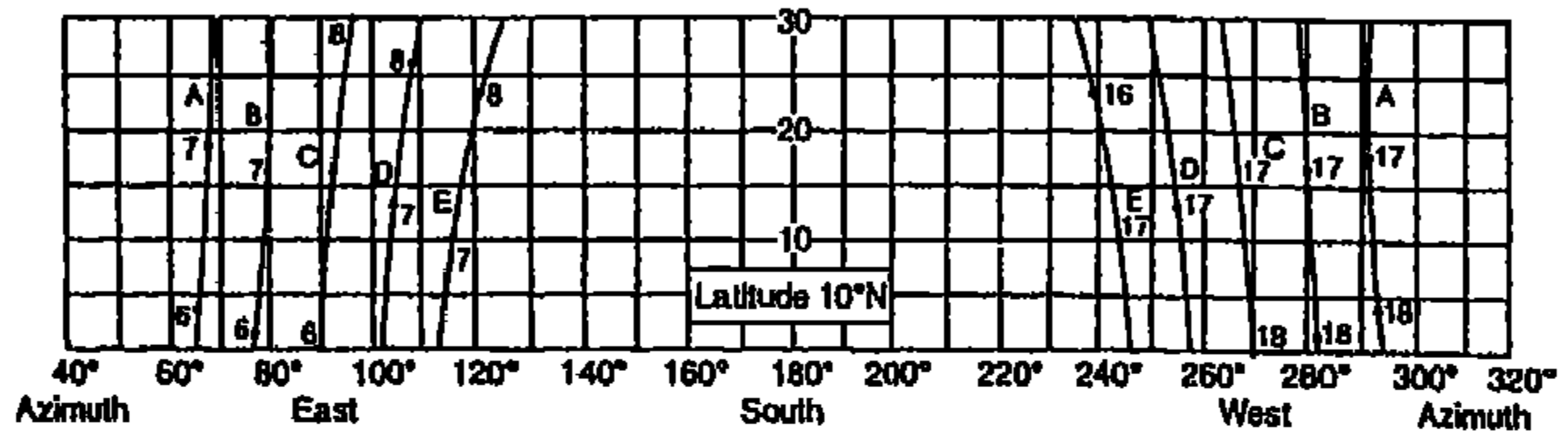
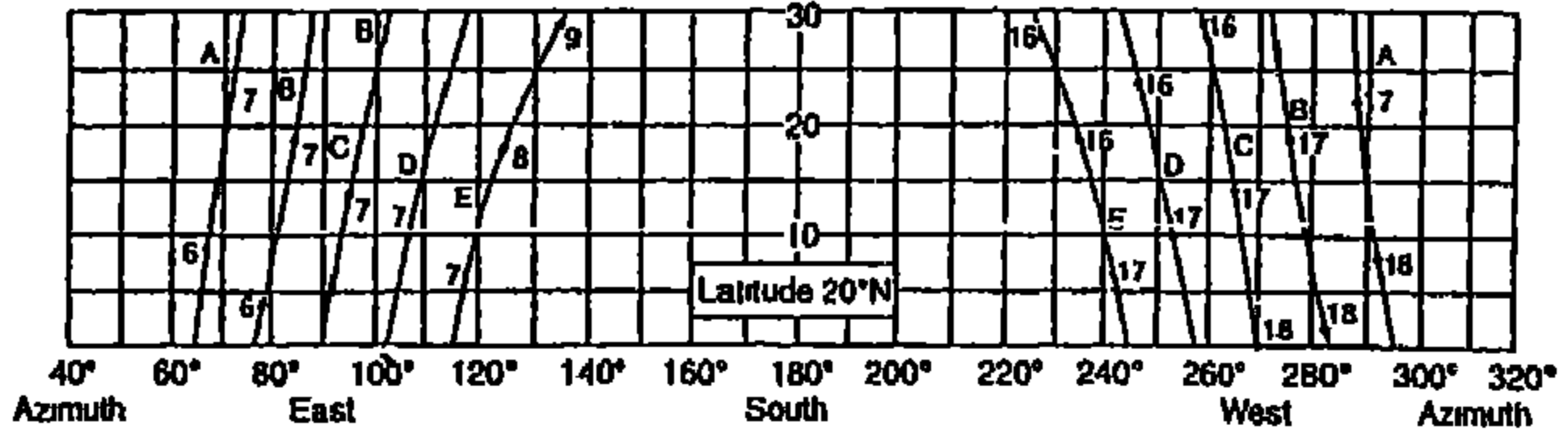
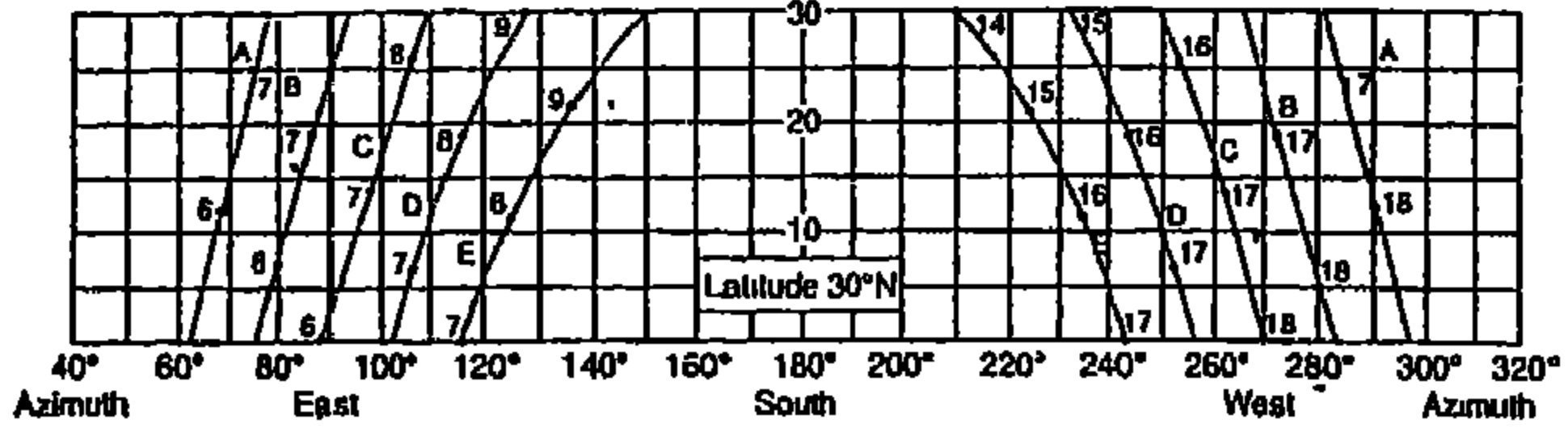
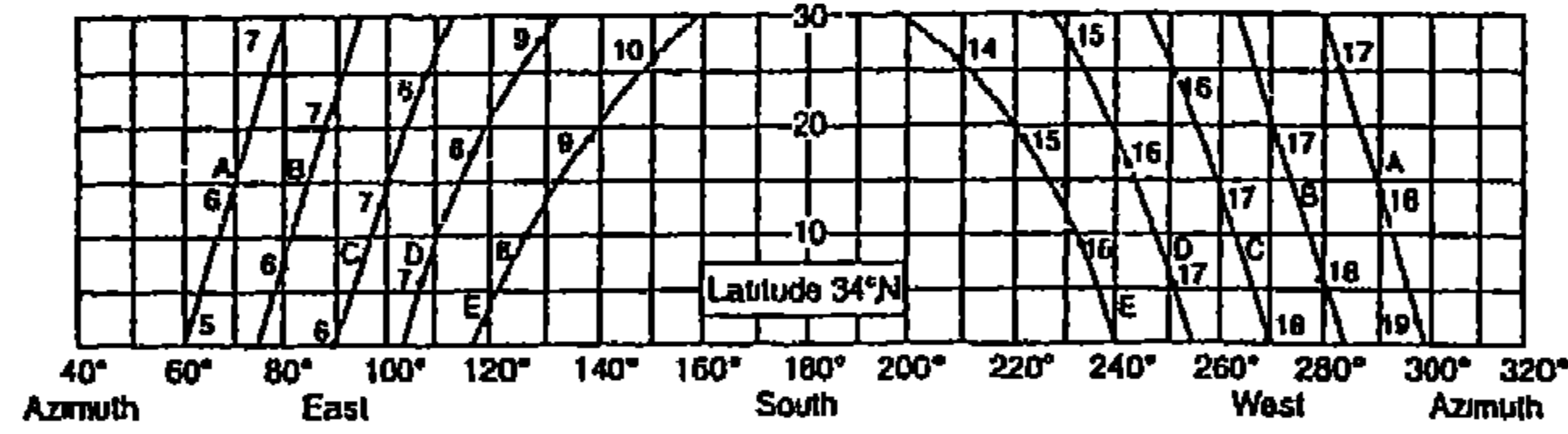
(أ) الانقلاب الصيفي

(ب)

(ج) الاعتدالان

(د)

(هـ) الانقلاب الشتوي



شكل (٣-١٥)

تغير زاوية ارتفاع الشمس والسمت



وأفضل الطرق لتقييم مدى ملائمة الموقع، قياس المنسوب الزاوى والاتجاه الزاوى true bearings للأشياء الممكن رؤيتها من الموقع. وباستعمال بوصلة وجهاز قياس الانحدار clinometer، قس المناسيب الزاوية و الاتجاهات الزاوية عبر قيم نطاق سمت الشمس المعطاة بشكل (٣-١٥). وإذا لم يزد امتداد الزاوية التى يحصرها الجسم عن ٣° فى نطاق سمت الشمس المبين بشكل (٣-١٥) عند خط العرض الواقعة عليه المحطة، فالموقع ملائم وفى الغرض. وإذا كانت الأجسام التى تعترض أشعة الشمس على مقربة فيمكن تحسين ظروف الموقع بتركيب المسجل على عمود من الطابوق أو على دعامة متينة يكفى ارتفاعها لتجنب هذه العوائق. ويتعين أن يسمح الارتفاع المختار للعمود بمعاينة المسجل وتغيير بطاقاته بالسهولة الواجبة.

### الدعامة:

يجب أن تكون الدعامة التى يركب عليها الجهاز ذات متانة كافية، ومصنعة من مادة غير معرضة للانفتال أو التشوه. وإذا أتيح موقع مناسب للتعرض للشمس وقريب من سطح الأرض فإن عمودا من طابوق البناء أو الخرسانة ذا مقطع مربع طول ضلعه ٣٦ سم وفى الغرض. ويختار ارتفاع العمود المناسب، وعادة ما يصل هذا الارتفاع إلى ١,٢ م، وينبغى أن تواجه جوانب العمود الأربعة، الجهات الأصلية الأربع. والدعامة المقامة فوق سطح بناء ينبغى أن تبلغ من الارتفاع ما يكفى لتجاوز أى عوائق قريبة تحجب الشمس. وتثبت القاعدة فى العمود عن طريق قطاعين حديديين طول كل منهما ٣٣ سم ومقطعه مربع طول ضلعه ٢,٥ سم، وأربعة مسامير تثبيت قاعدة قياسيين (١٠ مم) طول كل منهما ١٥ سم، وأربع علب أنبوبية قطرها الخارجى ١٥ مم وارتفاعها ٤٢ مم.

وتدفن مسامير التثبيت بداية فى العمود إلى عمق حوالى ٥ سم ( داخل طوب البناء أو الخرسانة )، على بعد حوالى ٤ سم من ناحيتى العمود الشمالية والجنوبية،

٨ سم من ناحيتى الشرق والغرب. ويسوى عندئذ السطح العلوى للعمود بالأسمنت بحيث يكون ناعما وأفقياً قدر الإمكان.

### الضبط:

والآن وقد تم انتقاء الموضع الملائم للمسجل، وتم تثبيته فيه جيداً بالمسامير الأربعة، لابد أن يوضع المسجل فى وضع متماثل فوق سطح العمود وتضبط القيم من حيث خط العرض وخط الطول الجغرافى والاستواء الأفقى. وسنجد أن الجهاز يجب أن يخضع للشروط الآتية إذا ما أريد منه أن يعطى تسجيلات مضبوطة:

(أ) ينبغى أن يتحد مركزا الكرة ووعائها.

(ب) المستوى الذى يحوى محور التماثل الطولى المركزى للبطاقة المخصصة للاعتدالين، وهى فى مكانها من المسجل ينبغى أن يمر بالمركز المشترك للكرة الزجاجة ووعائها وأن يتطابق مع مستوى خط الاستواء السماوى.

(ج) المستوى الرأسى المار بمركز الكرة، والذى يمر بمحور تماثل الوعاء لابد أن ينطبق مع مستوى خط الطول الجغرافى. ويقتضى هذا - بالمثل أن يوجه الوعاء فى اتجاه الشرق - الغرب.

(د) الطول المحلى الأساسى للكرة الزجاجة ينبغى أن يتساوى مع - أو يزيد قليلا عن نصف قطر الوعاء مقيسا حتى سطح بطاقة التدوين.

(هـ) لدى وضع بطاقة ما فى مكانها ينبغى أن تكون خطوط الساعة المطبوعة عبرها فى مستويات خطوط الطول للكرة السماوية، والتى تتأطر زوايا الساعة ١٥°، ٣٠°، ٤٥°، إلخ... مقيسة بالنسبة لخط الطول الجغرافى. جرينتش ويتم التأكد من الشرطين الأخيرين خلال التصنيع، أما الشروط

الثلاثة الأولى فيتحقق الأول منها في المصنع إبان مرحلة الاختبار، ويتحقق الآخران خلال تركيب الجهاز بالمحطة.

### ضبط الاستواء الأفقى:

إنه لأمر جوهري - قبل ضبط استواء الجهاز، أن يضبط بقدر معقول استواء سطح الدعامة التي سيركب عليها الجهاز وأن تكون الدعامة ذات متانة كافية، ولضبط استواء الجهاز ضع ميزان تسوية مضبوطاً عبر بوقى الوعاء، مع مراعاة الدقة في ضبط محور المستوى في اتجاه الشرق - الغرب تماماً، وأفضل الطرق للتحقق من ذلك بتثبيت بطاقة بالمسجل، وملامستها بميزان كحولى من الجهتين، أدخل قطعاً رقيقة من شرائح قصديرية بين القاعدة والعمود حتى تستقر الفقاعة الهوائية عند مركز ميزان التسوية. عندئذ ضع ميزان التسوية على القاعدة في الاتجاه من الشمال للجنوب واضبط حتى الوصول للاستواء الأفقى، ويتعين التأكد من الضبط الأول مرة أخرى بعد الضبط الثانى، وتعاد الخطوات كرة أخرى - إذا لزم الأمر - حتى تتحقق من دقة عمليتي الضبط كليهما.

### ضبط تطابق مركزى الكرة والوعاء:

يجرى هذا الضبط بالمصنع فى أثناء اختبار الجهاز للتحقق من انطباق مركزى الكرة ووعائها، ويجب ألا يختل هذا الانطباق بحال، ولا يمكن التأكد من تحققه بصورة مرضية إلا باستخدام أداة قياس لمركز الكرة ولا ينبغى الاعتماد فى هذا الشأن على مجرد المراقبة البصرية. وعند استلام مسجل درجة سطوع الشمس بالمحطة تكون كرتة منزوعة ومحفوظة فى شكل مستقل، ولوضع الكرة فى مكانها، ثبت واحداً من أطباق الكرة (٧) فى المسمار المحوى النحاسى ثم اربط على المسمار السفلى (٦) حتى تستقر الكرة بإحكام بينهما، والآن أحكم رباط صامولة التثبيت السفلى، ولا يجوز - بأى حال من الأحوال - العبث بهذا الربط

المحكم للمسمار العلوى أو لصامولة التثبيت (هناك ملحوظة تحذيرية بهذا المعنى ملصقة بالمسمار العلوى). وعلى أية حال، إذا كان ثمة شك فى صحة تطابق مركزى الكرة ووعائها، فيمكن تصحيح هذا الخلل بأداة قياس تطابق المراكز، والتي يمكن الحصول عليها - على سبيل الاستعارة من مصنع الجهاز، وتتكون أداة قياس تطابق المركز من شريحة معدنية مقوسة يمكن حشرها فى الوعاء فى موقع بطاقة الاعتدالين، ومثبت على الشريحة قوسان متعامدان على بعضهما البعض يزيد نصف قطر كل منهما بمقدار ١ مم عن نصف قطر الكرة، وتوضع أداة القياس فى الوعاء، بحيث يقع القوس المنتصب عمودياً فوق علامة وقت الظهيرة المبينة بالوعاء، وتسجل حينئذ المسافة من الكرة إلى القوسين، وتحرك أداة القياس مسافة ما إلى اليسار وإلى اليمين ويعاد تدوين الرصد، وإذا لم تكن هناك حاجة إلى ضبط التمرکز بين الوعاء والكرة، فيجب أن يتساوى بعدا القوسين عن الكرة فى جميع الأماكن (بمسافة بينية ١ مم)، وإذا ما احتاج وضع الكرة لضبط، فيمكن تغيير مركزها على طول الخط الذى يصل بين مسمارى التثبيت، وذلك بحل رباط صواميل التثبيت التى تحكم من وضعها مكانها وحل رباط أحد المسمارين مع ربط الآخر. أحكم رباط صامولة التثبيت قبل أن تعيد التأكد من سلامة الوضع بواسطة أداة القياس لمنع أى زحزحة إضافية تالية، وإذا استدعى الأمر رفع الكرة من الوعاء لأى غرض، فلا بد من مراعاة أن يتم حل رباط مسمار واحد فقط، فقد يفقد التطابق بين مركزى الكرة ووعائها إذا حل رباط المسمارين معاً.

### الضبط بالنسبة لخط العرض:

يمكن تعديل وضع الوعاء بالنسبة للقاعدة بحل رباط المسمارين (٨) اللذين يمسكان بلوحة المراجعة فوق الدعامات (٤)، وبتحريك القضيب النحاسى شبه الدائرى (٥) الذى يحمل المقياس الدال على خط العرض حتى تشير علامة السهم فوق التدرج إلى القراءة السليمة لخط العرض الذى به المحطة. أحكم رباط

مسامير الجهاز، ويضمن هذا الضبط أن يميل المستوى المار بمركز الكرة وخط تماثل بطاقة الاعتدالين - وهي موضوعة بالمسجل - على الرأسى بزاوية تساوى خط عرض المكان، هذا إذا كانت القاعدة مستوية أفقيًا.

### الضبط بالنسبة لخط الطول:

يجرى هذا الضبط عن طريق التأكد من أن صورة الشمس تعبر خط ساعة ما من خطوط بطاقة سطوع الشمس عند التوقيت المحلى الظاهرى بالضبط، والأفضل أن يتم ذلك لدى توقيت الظهيرة المحلى، إذ أن الخلل فى ضبط الاستواء الأفقى تقل أهميته عندئذ، ضع الجهاز بحيث يوازى محور الكرة محور الأرض، ويتعين أن يشير قطب الكرة المرتفع نحو الشمال تمامًا بالاستعانة بمزواة(\*) theodolite، وأفضل الطرق هو أن تضع دعامة الكرة - بالقدر المستطاع من الدقة - على استقامة الاتجاه الشمالى - الجنوبى بالاستعانة ببوصلة (مع حسابان ما هو مسموح به من انحراف ) أو بالاتجاه الزاوى من خريطة جغرافية، ثم احشر بطاقة فى المسجل واحصل على أثر احتراق - على سبيل التجربة.

فإذا وجدت أن علامة الأثر الاحتراقى الحادث تتحرك بطول البطاقة فى اتجاه مواز للخط، فالجهاز مضبوط، وإذا لم يكن الأمر كذلك فينبغى تحريك المسجل تحريكاً يسيراً عبر السميت حتى تحصل على الأثر الاحتراقى المضبوط، وعندما يكون موضع هذه العلامة التجريبية مرتفعاً على البطاقة لدى الصباح ومنخفضاً عليها بعد الظهر والمساء، فينبغى زحزحة القاعدة فى اتجاه عقارب الساعة (عند النظر إلى الجهاز من أعلى)، وفى حالة خطأ فى الاتجاه المعاكس يتم التحريك فى عكس اتجاه عقارب الساعة، ومن شأن زحزحة يسيرة أن تجلب فرقاً ملموساً فى ميل العلامة الاحتراقية عبر البطاقة.

---

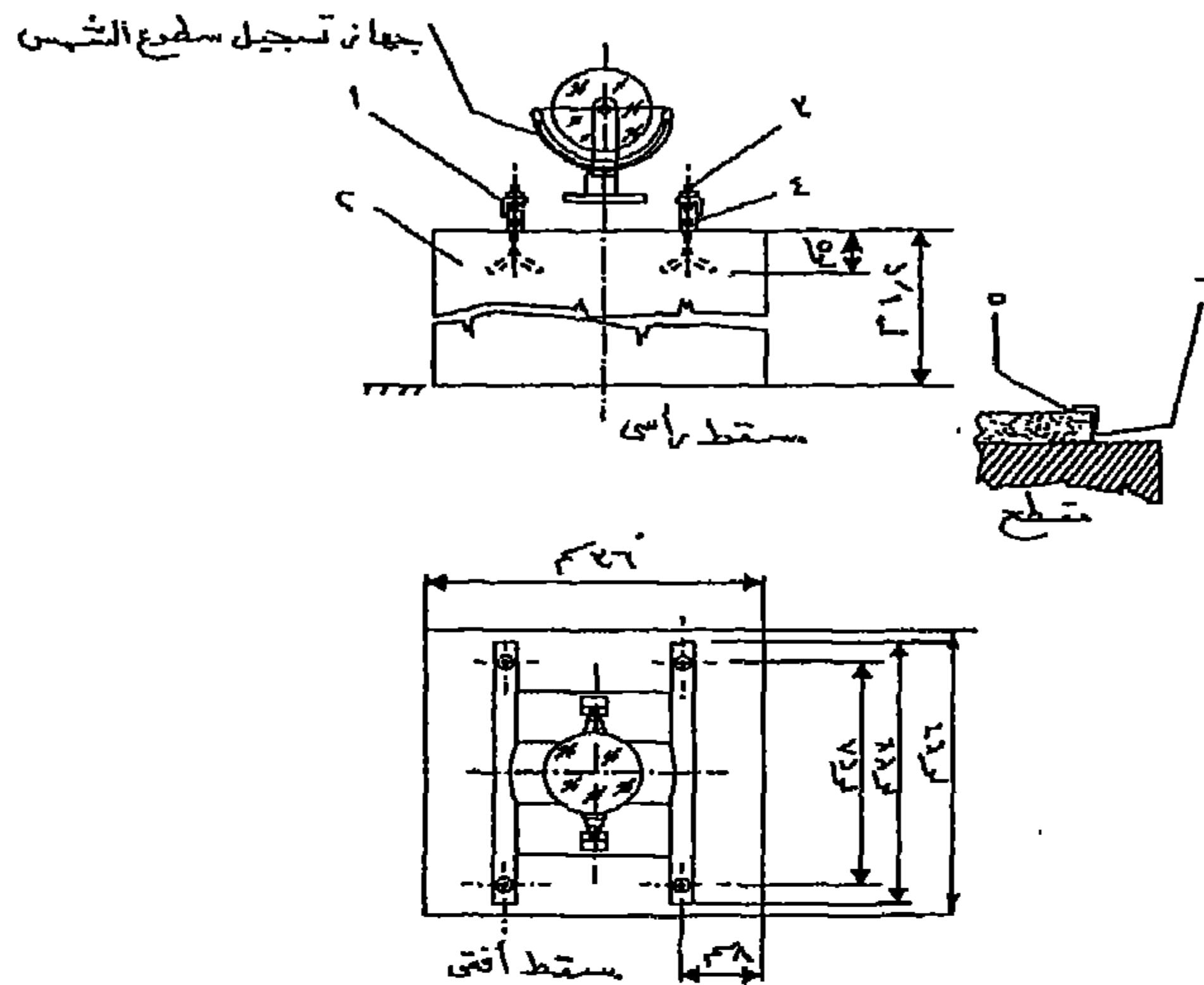
(\*) المزواة Theodolite: جهاز ضوئى لقياس الزوايا فى الاتجاهين الأفقى والرأسى ويكثر استخدامه فى الأغراض المساحية والهندسية (المترجم)

وعندما تتحرك العلامة موازية تمامًا لخط تماثل البطاقة فيعنى هذا أن الضبط بالنسبة لخط طول جرينتش قد تحقق وليس من الضروري إعادة ضبط المسجل إلا إذا حدث انفتال أو هبوط فى منسوب الدعامه بمرور الوقت.

### الضبط الختامى:

بعد إجراء كل أعمال الضبط السابقة بدقة، يمكن تأمين تثبيت القاعدة فى العمود تثبيتاً مستديماً بالخطوات التالية:

ضع شرائح مطاطية ذات سمك ٣ مم وعرض ٢ سم وطول ٢٠ سم على الحافتين الشرقية والغربية للقاعدة والقطعة الأنبوبية فوق المسامير الأربعة، ثم أدخل قطع الزوايا الحديدية فوقها كما هو مبين بشكل ( ٣ - ١٦ ) بحيث تتوافق الفتحات فى قطع الزوايا الحديدية (والمسافات بين هذه الفتحات ٢٨ سم) مع مسامير الأساسات.



( شكل ٣ - ١٦ )

الضبط الختامى لجهاز تسجيل سطوع الشمس

والآن أحكم ربط الصواميل فوق المسامير الأربعة، مع مراعاة أن يستقر الحشو المطاطي وينحشر بسمك منتظم بين القاعدة الرخامية والزاوية الحديدية المتداخلة معها، اختبر مرة ثانية الاستواء الأفقى للمسجل، وإذا لم يكن مستويًا أعد ضبط الاستواء بإدخال أسافين خشبية أو شرائح من القصدير بين قاعدة المسجل وقمة العمود بعد حل رباط الصواميل وتأكد مرة ثانية بعد إحكام ربط الصواميل، وبذلك يكون الجهاز قد أعد للاستعمال.

### أخطاء عملية الضبط:

مع صحة جميع عمليات الضبط تحقق مما يلي:

(أ) ينبغي أن تكون جميع التسجيلات فى شريط ضيق وواضحة عند الحواف.

(ب) يجب أن تكون العلامة الحادثة موازية لخطوط تماثل البطاقات.

(ج) يتعين أن يشير موضع صورة الشمس على البطاقات إلى التوقيت المحلى الظاهرى على مقياس الوقت المطبوع على البطاقات، ويمكن التأكد من هذا بحساب التوقيت القياسى للهند المناظر لوقت الظهيرة الظاهرى المحلى ليوم بعينه طبقاً للتعليمات المعطاة فى الملحق (١)، وإيجاد ما إذا كانت صورة الشمس (ووفقاً لتوقيت ساعة اليد) تقع على خط الظهيرة الخاص ببطاقة اليوم (طالما أنها فى وضع مضبوط).

وقد يسبب أى عيب فى الضبط فقداناً خطيراً فى البيانات المسجلة فى أوقات معينة من العام، إذ قد ينحرف موقع العلامة بحيث تقع خارج حافة البطاقة، والعلامة المتماثلة التى لا توازى الخط المركزى تشير إلى خطأ فى الضبط بالنسبة لخط العرض، أما العلامة غير المتماثلة فسببها خلل فى الضبط بالنسبة لخط

الطول، وعدم الاستواء الأفقى، والعلامة التى يكون موضعها صحيحاً عند الاعتدالين، ولكنها لا توازى خط المنتصف فى فصول السنة الأخرى تشير إلى زحزحة فى مركز الكرة بالمستوى المار بخط الاستواء السماوى، وسوء الضبط فيما يخص مركزى الكرة والوعاء يتسبب فى علامة عريضة وغير محددة بوضوح لدى الحواف.

### التشغيل:

إذا ركب الجهاز وضبط بطريقة صحيحة، فإنه لا يحتاج - فيما عدا تغيير البطاقات اليومية - إلى كبير عناية ، وفى الظروف الطبيعية ينبغى تغيير البطاقات عقب غروب الشمس كل يوم، ومما ينصح به فى الشهور المطيرة أن توضع البطاقة الجديدة فى الصباح الباكر قبل شروق الشمس، وإذا تعذر من الناحية العملية لسبب ما تبديل البطاقات بعد مغيب الشمس، فيمكن اختيار أى ساعة أخرى، بشرط الالتزام الدقيق بهذا التوقيت فيما بعد.

وهناك خطر يتمثل فى تداخل علامات الاحتراق فوق البطاقة إذا ما تغيرت توقيتات التبديل، فإذا كانت الشمس ساطعة لدى تثبيت البطاقة، فينبغى حجب الكرة حتى لا تحدث علامات احتراق مضللة، وإذا لم تبدل البطاقات عقب غروب الشمس، فلا بد من تسجيل الوقت المضبوط لتثبيتها ونزعها على البطاقة، وعند تثبيت البطاقات، لابد من مراعاة التأكد من أن خط الظهيرة على البطاقة منطبق بالضبط مع علامة الظهيرة على الوعاء، وإذا تعذر - بعد هطول مطر - نزع البطاقة دون تمزقها، فيجب قطعها، بالدوران بسكين حادة على امتداد حافة أحد البروزات التى تحفظها فى مكانها بكل عناية، ولابد من وضع بطاقة جديدة كل يوم، حتى وإن لم يسجل أى سطوع للشمس، ويجب تدوين التواريخ الصحيحة على ظهر كل البطاقات.



### استعمال البطاقات:

تستعمل ثلاث فئات من البطاقات، فالبطاقات الطويلة المقوسة متوافقة مع مجموعة الحواف السفلية البارزة، في حين تثبت البطاقات القصيرة المقوسة في مجموعة الحواف العلوية البارزة المتوافقة معها، وتثبت البطاقات المستوية المخصصة للاعتدالين في البروزات الوسطى، وهناك خطوط بيضاء (تشير للساعة) مطبوعة على البطاقات ومتعامدة مع الحواف الطويلة وموزعة توزيعاً متماثلاً حول علامة الظهيرة، وتشير التقاطعات للنقاط الواقعة على خط تماثل البطاقات، ويتراوح مقياس البطاقات بين ١٧,٥ ملليمتر / ساعة لدى الانقلابين، ١٩,١ ملليمتر / ساعة عند الاعتدالين.

وينبغي استعمال البطاقات الطويلة المقوسة المخصصة للصيف في الفترة ما بين ١٢ إبريل إلى ٢ سبتمبر، شاملة هذين اليومين. وتثبت بحيث تكون حافتها المحدبة إلى أعلى ما أمكن في حين تستعمل البطاقات القصيرة المقوسة المخصصة للشتاء ما بين ١٥ أكتوبر، ٢٨ فبراير (أو ٢٩ فبراير في السنوات الكبيسة)، بما في ذلك هذان اليومان.

وتخصص البطاقات المستوية لبقية أيام العام.

### تقدير قيمة متوسط الإشعاع الشمسي:

البيانات عن الإشعاع هي أفضل مصدر معلومات لتقدير متوسط الإشعاع الساقط، ومتى تعذر الحصول على بيانات من مواقع قريبة ذات مناخ مشابه، فمن الممكن استعمال العلاقات التجريبية في تقدير الإشعاع خلال ساعات السطوع الشمسي.

كانت معادلة الانحدار الأصلية من نوع أنجستروم تربط ما بين متوسط الإشعاع اليومي - خلال مدة شهر -، والإشعاع خلال يوم صاف مشمس في نفس الموقع محل الدراسة، ومتوسط نسبة ساعات سطوع الشمس:

$$\bar{H}_m = \bar{A} + \bar{B} \frac{\bar{N}}{\bar{N}_1} \quad (3-3)$$

حيث  $\bar{H}_m$  = متوسط الإشعاع اليومي - على مدى شهر - على سطح أفقى.

$\bar{H}_m$  = متوسط الإشعاع اليومي في يوم صافى السماء في نفس الموقع وخلال نفس الشهر.

أ، ب: ثابتان تجريبيان.

$\bar{N}$  = متوسط ساعات سطوع الشمس خلال اليوم على مدى شهر.

$\bar{N}_1$  = المتوسط الشهري لأقصى عدد ساعات ممكن من السطوع الشمسى (أى متوسط طول ساعات النهار في يوم متوسط من أيام الشهر).

وتقع الصعوبة الأساسية في تطبيق المعادلة (3-3) في غموض المقدارين  $\frac{\bar{N}}{\bar{N}_1}$ ،  $\bar{H}_m$  وقد عدل (باج) وآخرون الطريقة عام ١٩٦٤ بحيث تستند إلى الإشعاع خارج الغلاف الجوى على سطح أفقى، أكثر من استنادها إلى الإشعاع في يوم صاف:

$$\bar{H}_m = \bar{A} + \bar{B} \frac{\bar{N}}{\bar{N}_1}$$

حيث  $\bar{H}_m$  هو متوسط الإشعاع خارج جو الأرض لنفس الموضع خلال الفترة الزمنية محل البحث، أ، ب هما ثابتان معدلان، وفقاً لظروف الموضع، ويطلق على النسبة  $\frac{\bar{H}_m}{\bar{H}_s}$  مؤشر درجة الصفاء  $\bar{C}_m$  (ص)، وقد استخلصت علاقات تجريبية تربط بين متوسط الإشعاع اليومي في بحر شهر ( $\bar{H}_m$ )، والمتوسط الشهري للغطاء السحابى  $\bar{S}$ . وتأخذ العلاقة الصيغة:

$$\frac{\overline{H}}{\overline{H}_0} = \overline{A} + \overline{B} \overline{S}$$

وقد قارن بينيت (١٩٦٥) علاقة  $\frac{\overline{H}}{\overline{H}_0}$  مع  $\overline{S}$ ، بالنسبة  $\frac{\overline{N}}{\overline{N}_0}$  ومتغير ناجم من دمج المتغيرين، وتوصل إلى أن أفضل علاقة هي تلك مع  $\frac{\overline{N}}{\overline{N}_0}$ .

### بيانات الإشعاع الشمسى:

للمعلومات التالية عن الإشعاع أهميتها لاستيعابها واستعمالها:

(١) القياسات اللحظية (الإشعاعية irradiance) أو القيم التى نحصل عليها بإجراء تكامل عبر فترة زمنية (irradiation) هي عادة ساعة أو يوم.

(٢) الوقت أو الفترة الزمنية للقياسات.

(٣) قياسات الإشعاع الحزمى والإشعاع الانتشارى والإشعاع الشامل وأدوات القياس.

(٤) الفترة الزمنية التى يؤخذ المتوسط خلالها (مثلا المتوسطات الشهرية للإشعاع اليومى).

(٥) توجه السطح المتلقى للإشعاع (ما إذا كان أفقياً أو مائلاً ميلاً ثابتاً أو عمودياً على الإشعاع الحزمى).

ومعظم بيانات الإشعاع المتاحة تخص السطح الأفقى، وتشمل كلا الإشعاعين المباشر والانتشارى، وقد تم القياس ببيرانومتريات ثرموبيلية، وأغلب هذه الأدوات تعطى تسجيلات الإشعاع كدالة فى الزمن، ولا تعطى بذاتها وسيلة لإجراء التكامل الرياضى على هذه التسجيلات.

## تقييم مقدار الإشعاع مع سماء صافية:

بالنظر إلى تقلبات الظروف الجوية ووجود الغلاف الهوائي، تتغير مع الوقت بالمثل تأثيرات الجو في بعثرة الإشعاع وامتصاصه، ومما يفيد وضع تعريف قياسي لمفهوم "السماء الصافية" وحساب الإشعاع خلال ساعة والإشعاع اليومي الذي من شأنه أن يسقط على سطح أفقى في ظل هذه الظروف القياسية.

وقد ابتكر هوتيل (١٩٧٦) وسيلة ميسرة لتقدير الإشعاع الحزمى الذى ينتقل خلال الجو الصافى، تأخذ فى الحسبان زاوية السمى ومقدار الارتفاع عن الأرض لأربعة أنواع من المناخ و لظروف قياسية ومقدار نسبة توصيل الجو للإشعاع الحزمى بـ (النسبة  $\tau$  ب) تعطى بالمعادلة:

$$\tau = \tau_a + \tau_s - \tau_r \quad (3-4)$$

والثوابت  $\tau_a$ ،  $\tau_s$ ،  $\tau_r$  ك لظروف الجو القياسية فى مدى رؤية ٢٣ كم يمكن الحصول عليها بدلالة  $\tau_a$ ،  $\tau_s$ ،  $\tau_r$  \* والتى تحدد كدالة فى الارتفاع عن سطح الأرض (أقل من ٢,٥ كم) بالمعادلات:

$$\tau_a = 0.4237 - 0.00821 (E-6)^2 \quad (3-5)$$

$$\tau_s = 0.5055 - 0.00595 (E-6,5)^2 \quad (3-6)$$

$$\tau_r = 0.2711 - 0.01858 (E-2,5)^2 \quad (3-7)$$

حيث ع هو ارتفاع الراصد بالكيلو متر، وتدخل معاملات تصحيح على المقادير  $\tau_a$ ،  $\tau_s$ ،  $\tau_r$  \* طبقاً لنوعية المناخ، ويبين جدول (٣ - ١) مقادير

معاملات التصحيح

$$r = \frac{a}{a_*}, \quad r_s = \frac{s}{s_*}, \quad r_r = \frac{r}{r_*}$$

جدول (٣-١) معاملات التصحيح لفئات المناخ المختلفة

فئة المناخ	ج	ب	د
مناخ استوائي	٠,٩٥	٠,٩٨	١,٠٢
خط عرض متوسط - صيفا	٠,٩٧	٠,٩٩	١,٠٢
مناخ شبه قطبي - صيفا	٠,٩٩	٠,٩٩	١,٠١
خط عرض متوسط - شتاء	١,٠٣	١,٠١	١,٠٠

وهكذا فإن قدرة هذا الجو القياسي على نقل الإشعاع الحزمي يمكن التوصل لها لأية زاوية سمت وأى ارتفاع وحتى ٢,٥ كم، ويكون الإشعاع الحزمي الطبيعي للسماء الصافية.

$$\text{ش ص ح} = \text{ش. ط} - \tau \quad (٣-٨)$$

حيث يمكن إيجاد ش. ط من المعادلة:

$$\text{ش. ط} [ ١ + ٠,٠٣٣ \text{ جتا } \frac{٣٦٠}{٣٦٥} ] \quad (٣-٩)$$

والمقدار (ش. ط) هو الإشعاع خارج الغلاف الجوى مقيسا على سطح عمودى عليه لدى اليوم الذى ترتيبه من العام ن، والإشعاع الحزمي الأفقى لسماء صافية.

$$\text{ش ص ح} = \text{ش. ط} - \tau \text{ جتا } \theta \quad (٣-١٠)$$

ويكون الإشعاع الأفقى لسماء صافية لمدة ساعة I ص ح = I . ط -  $\tau$  جتا  $\theta$  ص

$$(٣-١١)$$

ويلزم كذلك تقدير الإشعاع الانتشارى لسماء صافية على سطح أفقى للحصول على الإشعاع الشامل.

وقد طور (ليو)، (جوردان) فى ١٩٦٠ علاقة تجريبية بين معامل انتقال الإشعاع الحزمى والانتشارى فى الأيام الصافية:

$$ح ر = ٠,٢٧١٠ - ٠,٢٩٣٩ - ح \quad (١٢-٣)$$

حيث  $ح ر = \frac{ش.ر}{ش.}$  (أو  $\frac{I}{I.}$ ) هى النسبة بين الإشعاع الانتشارى والإشعاع خارج الغلاف الجوى على سطح أفقى.

ويمكن تطبيق المعادلة (٣ - ١٢) لتقدير الإشعاع الانتشارى مع سماء صافية والذى إذا أضيف إلى الإشعاع الحزمى المتبأ به بطريقة (هوتيل)، نحصل على الإشعاع الكلى فى يوم ذى سماء صافية.

مثال (٣): احسب نسبة الانتقال لإشعاع حزمى فى ظروف صفاء جوى قياسية عند خط عرض ٤٣° شمالاً وارتفاع ٢٧٠ مترًا يوم ٢٢ أغسطس فى الساعة ١١، ٣٠ دقيقة قبل الظهر بالتوقيت الشمسى، احسب شدة الإشعاع الحزمى فى ذلك الوقت ومركبته على سطح أفقى واحسب بالمثل الإشعاع القياسى ليوم صاف على سطح أفقى.

الحل: فى يوم ٢٢ أغسطس، ن (ترتيب اليوم) = ٢٣٤، الميل declination، = ١١,٤ وجيب تمام زاوية السميت = ٠,٨٤٦، وتكون قيم المعاملات لدى ارتفاع ٠,٢٧ كم كالتالى:

$$أ. * = ٠,٤٢٣٧ - ٠,٠٠٨٢١ (٠,٢٧ - ٦) = ٠,١٥٤$$

$$أ. * = ٠,٥٠٥٥ - ٠,٠٠٥٩٥ (٠,٢٧ - ٦,٥) = ٠,٧٣٦$$

$$ك. * = ٠,٢٧١١ + ٠,٠١٨٥٨ (٠,٢٧ - ٢,٥) = ٠,٣٦٣$$

ومعامل التعديل بالنسبة لفئة الجو عند خط عرض متوسط وفى فصل الصيف

$$\tau = 0,154 + (0,97) \cdot 0,736 + (0,99) \cdot 0,363 - 0,846/(0,02) = 0,62$$

$$= 0,62$$

والمعادلة التي تعطى الإشعاع خارج الغلاف الجوى هي:

$$\text{ش.ن} = \text{ث ش} (1 + 0,003 \cdot \text{جتا} \frac{360}{365})$$

$$\text{حيث ث ش} = 1353 \text{ وات / م}^2, \text{ ش.ط} = 1325 \text{ وات / م}^2$$

$$\text{ش ص ط ح} = 1325 \times 0,62 = 822 \text{ وات / م}^2$$

$$\text{والمركبة العمودية على سطح أفقى} = 822 \times 0,846 = 695 \text{ وات / م}^2$$

ويلزم بالمثل تقدير الإشعاع الانتشارى فى جو صاف على سطح أفقى لحساب الإشعاع الإجمالى، وقد طور ليو وجوردان (1960) العلاقة التجريبية التالية بين معامل الانتقال للإشعاع الحزمى والانتشارى فى الأيام الصافية

$$\tau = 0,2710 - 0,2939 \tau$$

حيث  $\tau = \frac{G_d}{G_o}$  (أو  $\frac{I_d}{I_o}$ ) أى النسبة بين الإشعاع الانتشارى والإشعاع خارج الغلاف الجوى على مستوى أفقى:

ومن الحسابات السالفة نجد أن الإشعاع الحزمى على سطح أفقى لمدة ساعة

$$= 695 \times 3600 = 2,50 \text{ ميجا جول / م}^2$$

$$\text{أما } \tau = 0,2710 - 0,2939 (0,62) = 0,089$$

والسطوع الانتشارى diffuse irradiance على مستوى أفقى نحصل عليه من قيمة (ش.ت) يوم 22 أغسطس (1325 وات / م<sup>2</sup>) وجيب تمام الزاوية θ س عند الساعة 11,30 دقيقة = 0,846

$$\text{ش ص ش} = 1325 \times 0,089 \times 0,846 = 100 \text{ وات / م}^2$$

والإشعاع الانتشارى على مدى ساعة = ٠,٣٦ ميجاجول / م<sup>٢</sup>

مثال (٤): احسب الإشعاع العمودى خارج الغلاف الجوى، والإشعاع خارج الغلاف الجوى على سطح أفقى يوم ١٥ فبراير الساعة الثانية بعد الظهر عند خط عرض ٤٠° شمالاً، احسب أيضاً الإشعاع الشمسى الإجمالى على سطح أفقى خارج الغلاف الجوى فى نفس اليوم.

الحل: تحسب زاوية الميل declination فى ١٥ فبراير (ترتيب اليوم ن = ٤٦).

$$\delta = ٢٣,٤٥^\circ \text{ جا } \left[ \left( ٤٦ + ٢٨٤ \right) \frac{٣٦٠}{٣٦٥} \right] = -١٣,٣^\circ$$

وتحسب زاوية الساعة  $\omega$  عند الثانية بعد الظهر.

$$\omega = \frac{1}{4} + (\text{عدد الدقائق اعتباراً من وقت الظهيرة المحلى}) \frac{1}{4} = \frac{1}{4} (١٢٠) = ٣٠^\circ$$

$$\text{ولدى الغروب تكون } \omega = \text{جتا } ١^\circ \text{ (ظا } \delta \text{ طا } \delta) = \text{جتا } ١^\circ - [\text{ظا } ٤٠^\circ \text{ ظا } (١٣,٣) = ٧٨,٦^\circ]$$

ويحسب الإشعاع العمودى خارج الغلاف الجوى من العلاقة

$$\text{ش.ن} = \text{ث ش} [ ١ + ٠,٠٣٣ \text{ جتا } \left( \frac{٣٦٠}{٣٦٥} \right) ]$$

$$= ١٣٥٣ [ ١ + ٠,٠٣٣ \text{ جتا } \left( \frac{٤٦ \times ٣٦٠}{٣٦٥} \right) ] = ١٣٨٤ \text{ وات / م}^2$$

والإشعاع خارج الغلاف الجوى على سطح أفقى = ش. = ش.ن (جا  $\delta$  جا  $\delta$  + جتا  $\delta$  جتا  $\omega$ )

$$= ١٣٨٤ [ \text{جا } ٤٠^\circ \text{ جا } (١٣,٣) + \text{جتا } ٤٠^\circ \text{ جتا } (١٣,٣) ] = ٦٨٩ \text{ وات / م}^2$$

والإشعاع الإجمالى على سطح أفقى خارج الغلاف الجوى =  $H_o$



$$= \frac{24}{\text{ط}} \text{ ش.ن } [ \text{جتا } \delta \text{ جتا } \omega \text{ غ} + \left( \frac{\text{ط}^2 \omega}{360} \right) \text{ جا } \delta \text{ جا } \omega ]$$

$$= \frac{24}{\text{ط}} [3600 \times 1384] \text{ [جتا } 40 \text{ جتا } (-13,3) \text{ جا } 78,6 + \left( \frac{78,6 \times \text{ط}^2}{360} \right) ]$$

$$\text{جا } 40 \text{ جا } (-13,3) = 20,1 \times 10^7 \text{ جول / م}^2 = 20,1 \text{ ميغاجول / م}^2$$

مثال (٥): ما مقدار الإشعاع الشمسي على سطح أفقي بافتراض غياب الغلاف الجوي) عند خط عرض ٤٠ شمالاً يوم ١٥ إبريل بين الساعة ١٠، ١١ ؟

الحل: زاوية الميل = ٩,٤ ،  $\omega = 30$  ،  $\delta = 15$

$$I_o = \frac{3600 \times 12}{\text{ط}} (1353) [1 + 0,033 \text{ جتا } \left( \frac{30 - 15}{360} \right) \text{ط}^2] = 3,75 \text{ ميغا جول / م}^2$$

$$\text{جا } 43 \text{ جا } 9,4 + \text{جتا } 43 \text{ جتا } 9,4 \text{ (جا } (-15) \text{ - جا } (-30)) = 3,75 \text{ ميغا جول / م}^2$$

### مقياس الصفاء Clearness Index:

المتوسط الشهري لمقياس الصفاء  $\bar{V}$  هو النسبة بين متوسط الإشعاع الشهري على سطح أفقي ومتوسط الإشعاع اليومي خارج الغلاف الجوي على مدى شهر، وفي صورة معادلة:

$$\bar{V} = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o}$$

وبالإمكان بالمثل تعريف مقياس الصفاء اليومي (ص) كنسبة ما بين إشعاع يوم معين إلى الإشعاع خارج الغلاف الجوي لنفس اليوم:  $V = \frac{H}{H_o}$

كما يعرف مقياس الصفاء لساعة ما بالنسبة  $V_s = \frac{I}{I_o}$

وتأتي بيانات  $\bar{H}$ ،  $H$ ،  $I$  من القياسات لمجمل الإشعاع الشمسي على سطح أفقي بالاستعانة بجهاز بيرانومتر.

## مركبتا الإشعاع الحزمى والانتشارى فى الإشعاع لمدة ساعة:

تفيد معرفة مركبتى الإشعاع الحزمى والانتشارى لإشعاع لمدة ساعة فى ناحيتين، فأولاً، تحتاج طرق حسابات إجمالى الإشعاع على الأسطح ذات التوجهات الأخرى والمستقاة من البيانات الخاصة بسطح أفقى، تحتاج معالجة مستقلة لكل من الإشعاع الحزمى والانتشارى، ومن جهة أخرى ينبغى أن تؤسس تقييمات الأداء على المدى الطويل لأغلب المجمعات بالتركيز، على تقدير مدى إتاحة الإشعاع الحزمى.

وقد استخدم (أورجيل) و(هولاند) فى ١٩٧٧ العلاقات التالية لتقدير النسبة  $\frac{U_{ش}}{U}$

(الكسر من إشعاع الساعة الواحدة على سطح أفقى الذى ينتشر لدى مقياس صفاء للساعة ص س:

$$\left. \begin{array}{l} 1,0 - 0,249 \text{ ص إذا كانت ص } > 0,35 \\ 1,007 - 1,84 \text{ ص إذا كانت } 0,35 > \text{ ص } > 0,75 \\ 0,177 \text{ إذا كانت ص } < 0,75 \end{array} \right\} = \frac{U_{ش}}{U}$$

## مركبتا الإشعاع الحزمى والانتشارى فى إشعاع يومى:

أشارت الدراسات المتاحة عن الإشعاع اليومى إلى أن متوسط النسبة التى تنتشر  $\frac{U_{ش}}{U}$  دالة فى ص، وقد عبر (كولانىس بيريرا) و(رابل) عن هذه العلاقة بالمعادلات التالية:

$$\left. \begin{array}{l} 0,99 = \\ \text{إذا كانت ص} \geq 0,17 \\ 1,188 - 2,272 + 9,473 \text{ ص} 2 - 11,865 + 3,648 \text{ ص} 4 \text{ إذا كانت } 0,17 < \text{ص} < 0,75 \\ 0,54 - \text{ص} + 0,632 \text{ إذا كانت } 0,75 < \text{ص} < 0,80 \\ 0,2 = \text{إذا كانت ص} \leq 0,8 \end{array} \right\} \frac{\text{ش}}{\text{هـ}}$$

أما العلاقة التي أعطاها (ليو) و (جوردان) "فتأخذ الصورة

$$\frac{\text{ش}}{\text{هـ}} = 1,0045 + 0,04349 \text{ ص} - 3,5227 \text{ ص} 2 + 2,63 \text{ ص} 3$$

وهناك علاقة أخرى صاغها (إربس) وآخرون:

$$\left. \begin{array}{l} 1,0 - 2,727 \text{ ص} + 2,4495 \text{ ص} 2 \\ 11,9514 \text{ ص} 3 + 9,3879 \text{ ص} 4 \text{ إذا كانت ص} < 0,715 \\ 0,143 \text{ إذا كانت ص} < 0,715 \end{array} \right\} \frac{\text{ش}}{\text{هـ}} 81,4 > \text{لقيم } \omega$$

$$\left. \begin{array}{l} 1,0 + 0,2832 \text{ ص} - 2,5557 \text{ ص} 2 + 0,8448 \text{ ص} 3 \text{ إذا كانت ص} < 0,722 \\ 0,175 \text{ إذا كانت ص} < 0,722 \end{array} \right\} \frac{\text{ش}}{\text{هـ}} 81,4 < \text{ولقيم } \omega$$

**مركبتا الإشعاع الحزمي والانتشاري في متوسط الإشعاع الشهري:**

بين (كولاريس بيريرا) و (رابل) أن الكسر الذي ينتشر في متوسط الإشعاع الشهري  $\frac{\text{ش}}{\text{هـ}}$  هو دالة في متوسط مقياس الصفاء الشهري  $\text{ص} = \frac{\text{ش}}{\text{هـ}}$ ،  
والمعادلة للنسبة  $\frac{\text{ش}}{\text{هـ}}$

حيث قيم  $\omega$  بالدرجات، أي أن زاوية الساعة عند الغروب:

$$\frac{\text{ش}}{\text{هـ}} = 0,00653 + 0,775 - (0,00455 + 0,505)(90 - \omega) = 0,00455 + 0,505(90 - \omega)$$

جتا [١٥١ ص - ١٠٣]

### تقدير الإشعاع في ساعة ما من بيانات يوم:

عرف كولاريس بيريرا ورابل (١٩٧٩) القيمة  $n$ ، وهي النسبة من إجمالي إشعاع ساعة ما إلى إجمالي إشعاع اليوم بالمعادلة:

$$n = \frac{\text{جتا } \omega - \text{جتا } \omega غ}{\left( \frac{\text{جا } \omega غ}{360} \right) - \text{جا } \omega غ} \left( \frac{\text{ط}}{24} + \text{ب جتا } \omega \right)$$

ويعطى المعاملان  $a$ ،  $b$  من العلاقتين:

$$a = 0,409 + 0,5016 \text{ جا } (90 - \omega غ)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \text{ جا } (90 - \omega غ)$$

حيث  $\omega$  في هذه المعادلات هي زاوية الساعة بالدرجات في التوقيت محل البحث (منتصف الساعة التي تجري لها الحسابات مثلاً)،  $\omega غ$  هي زاوية الساعة لدى الغروب.

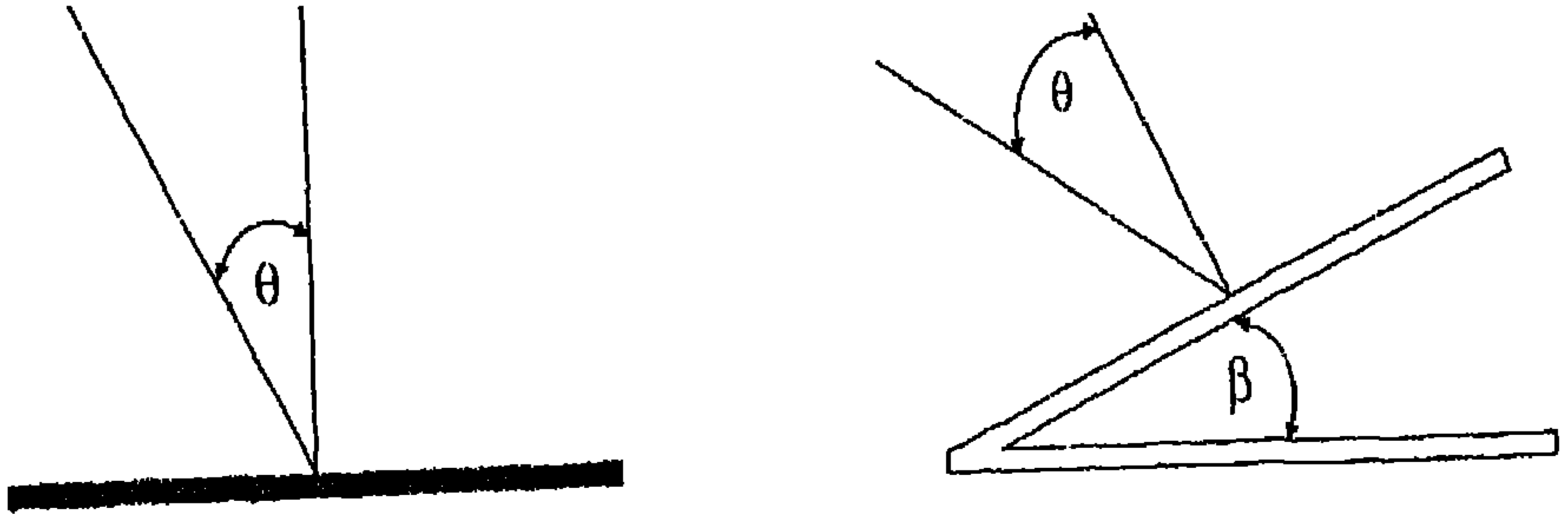
وقد عبر ليو وجوردان (١٩٦٠) عن  $n$  ش (النسبة بين الإشعاع الانتشاري في خلال ساعة إلى الإشعاع الانتشاري خلال يوم بالعلاقة:

$$n \text{ ش} = \left[ \frac{\text{جتا } \omega - \text{جتا } \omega غ}{\left( \frac{\text{جا } \omega غ}{360} \right) - \text{جا } \omega غ} \right] \frac{\text{ط}}{24}$$

النسبة بين الإشعاع الحزمى على سطح مائل وذلك على سطح أفقى:

يلزم - بصفة عامة - حساب الإشعاع لمدة ساعة على سطح مائل لمجمع من القياسات أو الحسابات لإشعاع الشمس على سطح أفقى لعمل التصميمات وحسابات الأداء، والبيانات الأكثر شيوعاً وتداولاً هي إجمالى الإشعاع لساعات أو لأيام على سطح أفقى فى حين نحتاج لمعلومات على الإشعاع على مستوى سطح المجمع سواء كإجمالى أو مقسماً إلى حزمى وانتشارى.

والنسبة بين الإشعاع الحزمى على سطح مائل إلى ذلك الإشعاع على سطح أفقى فى أى وقت والمعبر عنها بالرمز  $n$  يمكن حسابها بالضبط، ويبين شكل (٣-١٧) زاوية سقوط الإشعاع الحزمى على سطحين أفقى ومائل.



( شكل ٣ - ١٧ )

الإشعاع الحزمى على سطحين أفقى ومائل

وتعطى النسبة  $\frac{G_{hl}}{G_b}$  ( الإشعاع الحزمى على سطح مائل / الإشعاع الحزمى الكلى ) بالمعادلة

$$n = \frac{G_{hl}}{G_b} = \frac{G_{bn} \cos \theta}{G_{bn} \cos \theta_s} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_s}$$

ويمكن تحديد جتا  $\theta$   $\gamma$  بالعلاقة التي سبق ورودها بالكتاب<sup>(\*)</sup>، وزاوية السميت المثلى للمجمعات ذات الصفائح المسطحة تساوى - عادة - صفراً فى نصف الكرة الشمالى (أو ١٨٠° فى نصف الكرة الجنوبى) وينتج من ذلك أن:

$$N = \frac{\text{جتا } (\beta - \theta) \text{ جتا } \delta \text{ جتا } \omega + \text{جا } (\beta - \theta) \text{ جا } \delta}{\text{جتا } \theta \text{ جتا } \delta \text{ جتا } \omega + \text{جا } \theta \text{ جا } \delta}$$

وفى نصف الكرة الجنوبى  $\gamma = ١٨٠^\circ$  وتعطى  $N$  من العلاقة

$$N = \frac{\text{جتا } (\beta + \theta) \text{ جتا } \delta \text{ جتا } \omega + \text{جا } (\beta + \theta) \text{ جا } \delta}{\text{جتا } \theta \text{ جتا } \delta \text{ جتا } \omega + \text{جا } \theta \text{ جا } \delta}$$

### إجمالى الإشعاع على الأسطح المنحدرة المثبتة:

تمتص المجمعات ذات الصفائح المسطحة كلا الإشعاعين الحزمى والانتشارى الشمسيين، ولابد من معرفة  $N$  (النسبة بين الإشعاع على سطح مائل، وذلك الإشعاع على سطح أفقى) لكى نستعمل بيانات الإشعاع الإجمالى على سطح أفقى فى تحديد الإشعاع على سطح مائل:

$$N = \frac{I_m}{I} = \frac{\text{الإشعاع الكلى على سطح مائل}}{\text{الإشعاع الكلى على سطح أفقى}}$$

ويمكن التعبير عن ( $N$ ) بدلالة الإشعاع الحزمى والانتشارى:

$$N = \frac{I_{zm}}{I_z} = \frac{\text{الإشعاع الحزمى على سطح مائل}}{\text{الإشعاع الحزمى على سطح أفقى}}$$

$$N_s = \frac{I_{sm}}{I_s} = \frac{\text{الإشعاع الانتشارى على سطح مائل}}{\text{الإشعاع الانتشارى على سطح أفقى}}$$

$$N = \frac{I_z}{I} N_z + \frac{I_s}{I} N_s$$

(\*) هى العلاقة الواردة حين بحث الزوايا والعلاقات بينها بشكل (٣-٥) (المترجم)

وقد اقترح هوتيل وفورتس (١٩٤٢) فكرة أن المركبة الانتشارية متجانسة التوزيع عبر السماء، وفي ظل هذا الافتراض تكون ن ش دوماً مساوية للوحدة وتعطى طاقة الإشعاع irradiation على سطح مائل في خلال ساعة بالمعادلة:

$$I_m = I_z \cos \theta_z + I_s \sin \theta_z$$

والنسبة الفعالة ن بين الطاقة الشمسية على سطح مائل وتلك على سطح أفقى تكون

$$n = \frac{I_m}{I_z} = \frac{I_z \cos \theta_z}{I_z} + \frac{I_s \sin \theta_z}{I_z}$$

ولقد أدخل ليو وجوردان (١٩٦٣) تطويراً على هذا النموذج، بأن اعتبروا الإشعاع على سطح مائل مكوناً من ثلاث مركبات: الإشعاع الحزمى والإشعاع الشمسى الانتشارى والإشعاع الشمسى المنعكس - بصورة انتشارية - من سطح الأرض، فالسطح المائل بزاوية  $(\beta)$  على الأفقى له معامل توجهه أو رؤية view factor مع السماء مقداره  $(1 + \cos \beta) / 2$ ، وإذا كان الإشعاع الشمسى الانتشارى متجانساً فى كل الاتجاهات فكذلك هى النسبة ن ش.

وللسطح معامل مواجهة مع الأرض مقداره  $(1 - \cos \beta) / 2$ ، وإذا كان للوسط المحيط معامل انعكاسية قدره أ ( للإشعاع الشمسى الكلى )، فإن الإشعاع المنعكس من الوسط المحيط على السطح لمدة ساعة هو مجموع الثلاث مركبات:

$$I_j = I_z \cos \theta_z + I_s \sin \theta_z + \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) (I_z \cos \theta_z + I_s \sin \theta_z) \cdot A$$

$$\text{وبحكم تعريف (ن): } n = \frac{I_j}{I_z} = \frac{I_z \cos \theta_z}{I_z} + \frac{I_s \sin \theta_z}{I_z} + \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) A$$

ويقترح ليو وجوردان قيمة لمعامل انعكاسية الأرض الانتشارية قدره (٠,٢) فى حالة غياب الجليد، ٠,٧ فى حالة وجود غطاء جليدى جديد، والحدان الأخيران فى المعادلة يعتبران معاً أحياناً بمثابة الإشعاع الانتشارى الساقط على السطح.

### متوسط الإشعاع على الأسطح المنحدرة والمثبتة:

لدى خطوات العمل لتصميم منظومات التسخين بالطاقة الشمسية نحتاج كذلك لمعرفة ن: النسبة بين المتوسط اليومي للإشعاع على سطح مائل على مدى شهر، وذلك الإشعاع على سطح أفقى، وخطوات حساب ن شبيهة بخطوات حساب ن، أى تتم بإضافة مركبات الإشعاع الحزمى والإشعاع الانتشارى والإشعاع الشمسى المنعكس من سطح الأرض، وبافتراض تجانس كل من الإشعاع الانتشارى والمنعكس فى جميع الاتجاهات، بوسعنا التعبير عن النسبة الشهرية المتوسطة ن بالصيغة:

$$\bar{N} = \frac{\bar{H}_m}{\bar{H}_h} = \left( \frac{\bar{H}_{sh}}{\bar{H}_h} - 1 \right) \bar{N}_z + \left( \frac{\beta + 1}{2} \right) \frac{\bar{H}_{sh}}{\bar{H}_h} + \left( \frac{1 - \beta}{2} \right) \bar{A}$$

$$\text{أى أن: } \bar{H}_m = \bar{H}_h \left( \frac{\bar{H}_{sh}}{\bar{H}_h} - 1 \right) \bar{N}_z + \bar{H}_h \left( \frac{\beta + 1}{2} \right) \frac{\bar{H}_{sh}}{\bar{H}_h} + \bar{H}_h \left( \frac{1 - \beta}{2} \right) \bar{A}$$

والنسبة  $\frac{\bar{H}_{sh}}{\bar{H}_h}$  هى نسبة متوسط الإشعاع الانتشارى اليومي على مدى شهر إلى متوسط الإشعاع الإجمالى اليومي على مدى شهر على سطح أفقى، وهى دالة فى ص م، ن ز هى نسبة متوسط الإشعاع الحزمى اليومي على سطح مائل إلى ذلك الإشعاع على سطح أفقى لمدة شهر،  $\bar{H}_m / \bar{H}_z = \bar{H}_z$ .

وللأسطح المنحدرة صوب خط الاستواء فى نصف الكرة الشمالى، أى للسطوح ذات قيمة  $\gamma = 0^\circ$ :

$$\bar{N}_z = \frac{\cos(\beta - 0) \cos \delta \cos \omega + \sin \beta \sin \delta \cos \omega + \cos(\beta - 0) \sin \delta \sin \omega}{\cos 0 \cos \delta \cos \omega + \sin 0 \sin \delta \cos \omega + \cos 0 \sin \delta \sin \omega}$$



حيث  $\omega$  هي زاوية الساعة لدى الغروب للسطح المائل في اليوم المتوسط من الشهر، وتعطى بالقيمة الأقل من القيمتين:  $\text{جتا } \omega^-$  ( $-\text{ظا } \theta \text{ ظا } \delta$ ) أو  $\text{جتا } \omega^+$  ( $-\text{ظا } (\beta - \theta) \text{ ظا } \delta$ )، أيهما أقل.

وللأسطح الواقعة في نصف الكرة الجنوبي والمنحدرة صوب خط الاستواء، حيث  $\gamma = 180^\circ$ :

$$\bar{N}_Z = \frac{\text{جتا } (\beta + \theta) \text{ جتا } \delta \text{ جتا } \omega_{180}^\pm + \text{جتا } (\beta + \theta) \text{ جتا } \delta}{\text{جتا } \theta \text{ جتا } \delta \text{ جتا } \omega_{180}^\pm + \text{جتا } \theta \text{ جتا } \delta}$$

،  $\omega = \omega^-$  ( $-\text{ظا } \theta \text{ ظا } \delta$ ) أو  $\omega^+$  ( $-\text{ظا } (\beta + \theta) \text{ ظا } \delta$ )، أيهما أقل.

مثال (٦): احسب متوسط الإ. ش. شعاع الشمس الإجمالي اليومي على مدى شهر على سطح يواجه جهة الجنوب ومائل بزاوية  $35^\circ$  في موقع على خط عرض  $35^\circ$  شمالاً وذلك خلال: (أ) شهر يناير، (ب) شهر يونيو بمعلومية القيم التالية للمتوسط اليومي على مدى الشهر للتعرض للشمس لسطح أفقى:

هـ = ٩٥٥٠ كيلو جول / م<sup>٢</sup> في اليوم خلال يناير.

هـ = ٢٦٨٠٠ كيلو جول / م<sup>٢</sup> في اليوم خلال يونيو.

هـ = ١٨٠٧٠ كيلو جول / م<sup>٢</sup> في اليوم خلال يناير.

هـ = ٤١١٣٠ كيلو جول / م<sup>٢</sup> في اليوم خلال يونيو.

$$\text{الحل (أ): ص م} = \frac{9550}{18070} = 0,529$$

$$\frac{\text{هـ ش}}{\text{هـ}} = 1,390 - 4,027 \text{ ص م} + 5,531 \text{ ص م} - 3,108 \text{ ص م}^3$$

$$= 1,390 - 4,027(0,529) + 5,531(0,529)^2 - 3,108(0,529)^3$$

$$= 0,35$$

واليوم المتوسط المحبذ لشهر يناير هو يوم ١٧ يناير (أى أن ترتيب اليوم = ١٧)

$$\delta = 23,45^\circ \text{ جا } \left[ \frac{360}{365} (17 + 284) \right] - 20,9^\circ$$

وزاوية الساعة للغروب على سطح مائل هي:

$$\omega_g = \text{جتا}^{-1} (-\text{ظا } \delta \text{ ظا } \theta) \text{ أو جتا}^{-1} [-\text{ظا } 35 \text{ ظا } (-20,9)] = 74,5^\circ$$

وتعطى زاوية الساعة لدى الغروب على سطح مائل  $\omega_g$  بأقل المقدارين

$$\omega_g \text{ أو جتا}^{-1} [-\text{ظا } (\beta - \theta) \text{ ظا } \delta]:$$

$$\text{جتا}^{-1} [-\text{ظا } (\beta - \theta) \text{ ظا } \delta] = \text{جتا}^{-1} [-\text{ظا } (35 - 35) \text{ ظا } (-20,9)] = 90^\circ$$

$$\text{وعليه فإن } \omega_g = 74,5^\circ$$

$$\bar{N} = \frac{\text{جتا } (\beta - \theta) \text{ جتا } \bar{\omega}_g + \frac{\text{ط}}{180} \text{ جتا } (\beta - \theta) \text{ جتا } \bar{\omega}_g}{\text{جتا } \theta \text{ جتا } \bar{\omega}_g + \frac{\text{ط}}{180} \text{ جتا } \theta \text{ جتا } \bar{\omega}_g} = \frac{\text{جتا } (35 - 35) \text{ جتا } (20,9) + 74,5 \frac{\text{ط}}{180} \text{ جتا } (35 - 35) \text{ جتا } (20,9)}{\text{جتا } 35 \text{ جتا } (20,9) + 74,5 \frac{\text{ط}}{180} \text{ جتا } 35 \text{ جتا } (20,9)}$$

وبافتراض معامل انعكاسية للأرض ع قدره ٠,٢ يحسب المعامل  $\bar{N}$

$$\bar{N} = \left( \frac{\bar{H}_s}{\bar{H}} \right) \bar{N} + \left( \frac{1 + \beta}{2} \right) \frac{\bar{H}_s}{\bar{H}} + \left( \frac{1 - \beta}{2} \right) \text{ع} = (1,91) (0,35 - 1) + \frac{1 + \text{جتا } 35}{2} \cdot 0,2 + \frac{1 - \text{جتا } 35}{2} = 1,08$$

ولنحسب الآن متوسط الإشعاع اليومي الكلى على سطح مائل لشهر يناير:

$$\bar{H}_m = \bar{N} \bar{H} = 1,08 \times 9550 = 10100 \text{ كيلو جول / م}^2 \text{ فى اليوم}$$

(ب) باتباع ذات الخطوات كما فى الفقرة (أ):  $\bar{V}_m = 0,652$

وباستخدام صيغة كولاريس بيريرا ورايل:  $\frac{\overline{H_s}}{\overline{H}} = 0,37$

$\delta = 23,1$  (وباعتبار اليوم المحبذ ١١ يونيو فإن ترتيبه  $N = 162$ )

$$\omega_g = 10,7^\circ$$

$$\omega_g = \text{جتا}^{-1} [-\text{ظا} (\beta - \delta) \text{ ظا } \delta] = 9,0^\circ, \omega'_g = 9,0^\circ$$

$$\overline{N} = 80,6$$

$$\overline{N} = 86,2$$

$$\overline{H_m} = 23100 \text{ كيلو جول / م}^2 \text{ في اليوم}$$

مثال (٧): احسب متوسط الإشعاع الإجمالي ومتوسط الإشعاع الانتشاري للساعة ما بين ١٠,٠٠، ١١,٠٠ صباحًا، والساعة ما بين ١,٠٠، ٢,٠٠ بعد الظهر (بالتوقيت الشمسي) في شهر يونيو على سطح أفقي يقع على خط عرض  $40^\circ$  شمالاً، علماً بأن المتوسط اليومي للإشعاع الكلي على مدى شهر على سطح أفقي  $\overline{H_m}$  عند موقع هذا السطح لشهر يونيو  $= 22150$  كيلو جول / م<sup>2</sup> في اليوم، وبمعلومية المعادلة التجريبية التالية:

$$\frac{\overline{H_s}}{\overline{H}} = 1,390 - 4,027 \overline{V_m} + 5,531 \overline{V_m}^2 - 3,108 \overline{V_m}^3$$

$$\overline{H_m} = 41330 \text{ كيلو جول / م}^2 \text{ في اليوم.}$$

حيث  $\overline{H_s} =$  المتوسط اليومي للإشعاع الانتشاري على مدى شهر على سطح أفقي.

$$\overline{V_m} = \frac{\overline{H}}{\overline{H_m}}$$

$\overline{H_m} =$  المتوسط اليومي للإشعاع الإجمالي على مدى شهر خارج الغلاف الجوي على سطح أفقي

$$\text{الحل: ص م} = \frac{\overline{\text{هـ}}}{\overline{\text{هـ}}} = \frac{22150}{41330} = 0,536$$

$$\overline{\text{هـ}} = \frac{1,390 - 4,027 + (0,536) 5,031 + (0,536) 3,108 - (0,536)^2}{0,342} = 0,342$$

ومن ثم فإن  $\overline{\text{هـ}} = 0,342$   $\overline{\text{هـ}} = 22150 \times 0,342 = 7580$  كيلو جول / م<sup>2</sup> في اليوم

اليوم المفضل لحساب المتوسط اليومي لشهر يونيو هو يوم ١١ يونيو (وترتيبه ن = ١٦٢) وتحسب زاوية الميل الشمسي من العلاقة  $\delta = 23,45$  جا  $\frac{360}{365} (284 + \text{ن})$

$$23,45 = 23,1 \text{ جا } \left[ \frac{360}{365} (284 + 162) \right]$$

وتحسب زاوية الساعة عند الغروب  $\omega$  من العلاقة  $\omega = \text{جتا}^{-1} [ - \text{ظا } \delta ]$

$$\omega = \text{جتا}^{-1} [ - \text{ظا } 23,1 ] = 111^\circ$$

$$\text{سنستخدم الآن العلاقة: } \text{ن} = \frac{\text{ط}}{24} (أ + \text{ب جتا } \omega) - \frac{\text{جتا } \omega - \text{جتا } \omega}{\left( \frac{\text{ط}^2}{360} \right) - \text{جتا } \omega}$$

حيث ن = نسبة الإشعاع الكلي خلال ساعة، إلى الإشعاع الكلي خلال اليوم.

$$أ = 0,409 + 0,5016 \text{ جا } (60 - \omega)$$

$$\text{ب} = 0,6609 - 0,4767 \text{ جا } (60 - \omega)$$

$$\text{ن} = \frac{\left( \frac{\text{ط}}{24} \right) (\text{أ} + \text{ب جتا } \omega) - \text{جتا } \omega}{\left( \frac{\text{ط}^2}{360} \right) - \text{جتا } \omega}$$

ن ش = نسبة الإشعاع الانتشارى خلال ساعة إلى الإشعاع الانتشارى فى اليوم  
 $\omega$  غ = زاوية الساعة عند الغروب بالدرجات،  $\omega$  زاوية الساعة بالدرجات  
عند منتصف الساعة بالحساب نحصل على ن = 0,110 يوم / ساعة

$$ن ش = 0,102 \text{ يوم / ساعة}$$

متوسط الإشعاع الكلى خلال ساعة =  $0,110 \times 22150 = 2440$  كيلو  
جول / م<sup>2</sup>

ومتوسط الإشعاع الانتشارى خلال ساعة =  $0,102 \times 7580 = 773$  كيلو  
جول / م<sup>2</sup>

### بعض الاستخدامات المهمة:

### التجفيف بالطاقة الشمسية:

يمثل التجفيف بالشمس أسلوبًا تقليديًا فى حفظ المأكولات، وتزيل عملية  
التجفيف الرطوبة وتعين على الحفاظ على المنتجات الغذائية، والأسلوب العتيق منذ  
القدم لتجفيف المحاصيل الغذائية لدى الدول النامية يعتمد على نشر المنتجات  
مكشوفة تحت الشمس المباشرة فى شكل طبقات رقيقة وهو ما قد يسمى بالتجفيف  
الشمسى المكشوف أو التجفيف الطبيعى.

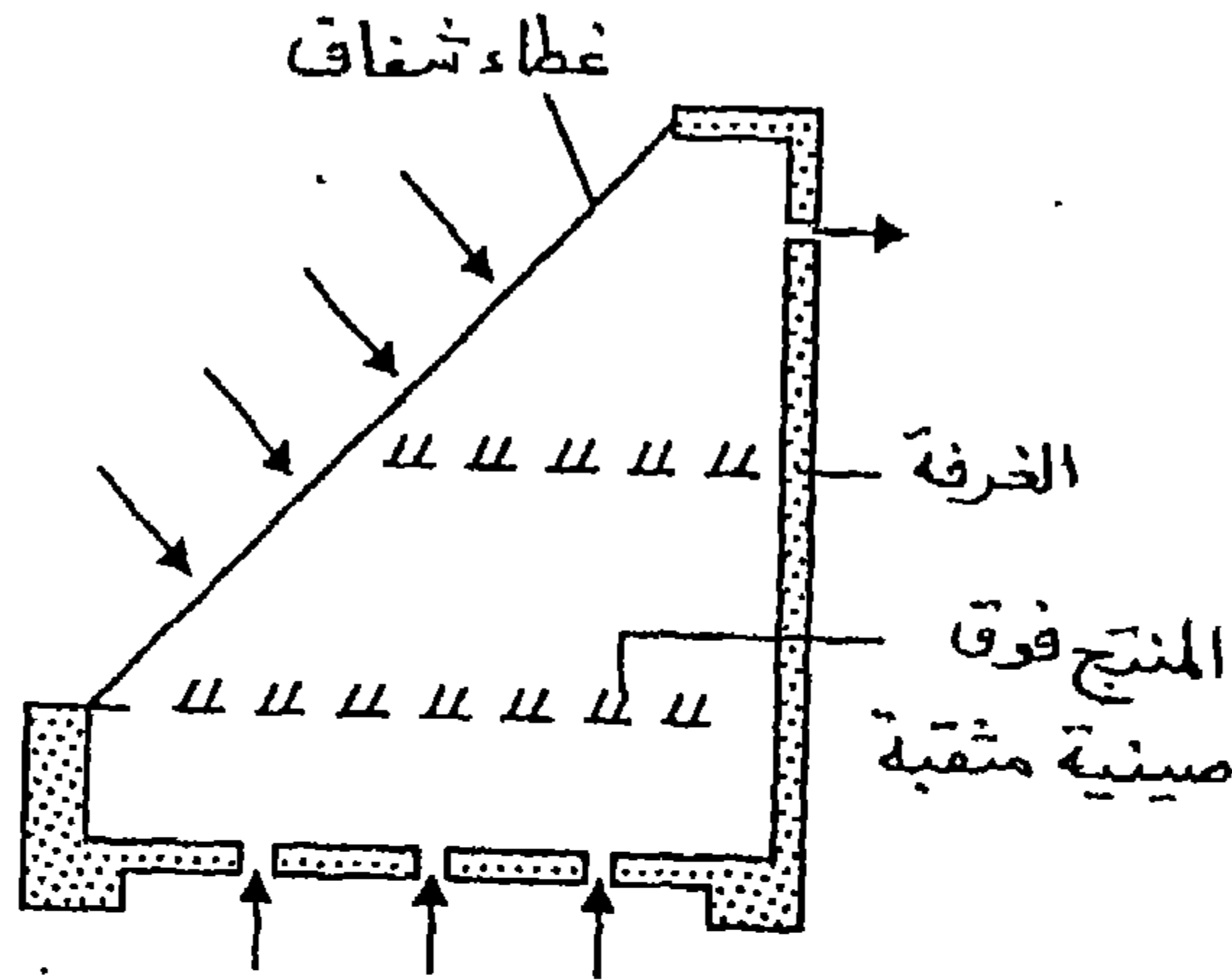
ويعيب هذه الطريقة البطء وتلوث المنتجات بالحشرات والغبار.

وفى التحكم التقليدى فى عملية التجفيف تكون الكهرباء هى مصدر الطاقة أو  
النفط أو الغاز الطبيعى أو الفحم، وفى الوسع تسخير الطاقة الشمسية فى تجفيف  
المحاصيل لتحقيق أكبر وفر اقتصادى ممكن، وقد جرت محاولات فى الماضى فى  
هذا الاتجاه.

ويعنى التجفيف المحكوم فى الواقع التحكم فى متغيرات عملية التجفيف مثل درجة حرارة الهواء ونسبة الرطوبة والمحتوى منها ومعدل التجفيف ومعدل سريان الهواء، وعلى ذلك فلا بد لدى تصميم المجفف الشمسى من أخذ جميع هذه المتغيرات فى الحسبان إلى جانب صلاحية معدات التجفيف.

وتصنف كل المجففات على أساس أسلوب تشغيلها إلى فئتين:

مجففات بتيارات الحمل الطبيعية والمجففات بالتيارات الاصطناعية، ويبدو تشغيل المجففات التى تعمل بتيارات الحمل الطبيعية أكثر جاذبية فى البلاد النامية، حيث إنها لا تحتاج لأى نوع من المراوح أو ناخضات الهواء التى تعمل بالطاقة الكهربائية، علاوة على قلة تكاليفها وسهولة تشغيلها، إلا أن هناك مشكلات فى استعمال هذه المجففات، تتلخص فى بطء التجفيف، وصعوبة التحكم فى درجات الحرارة والرطوبة وقلة الكميات التى يمكن تجفيفها، علاوة على أن تعرض بعض المنتجات المباشر للشمس يحدث بها تغيراً فى اللون أو الطعم.

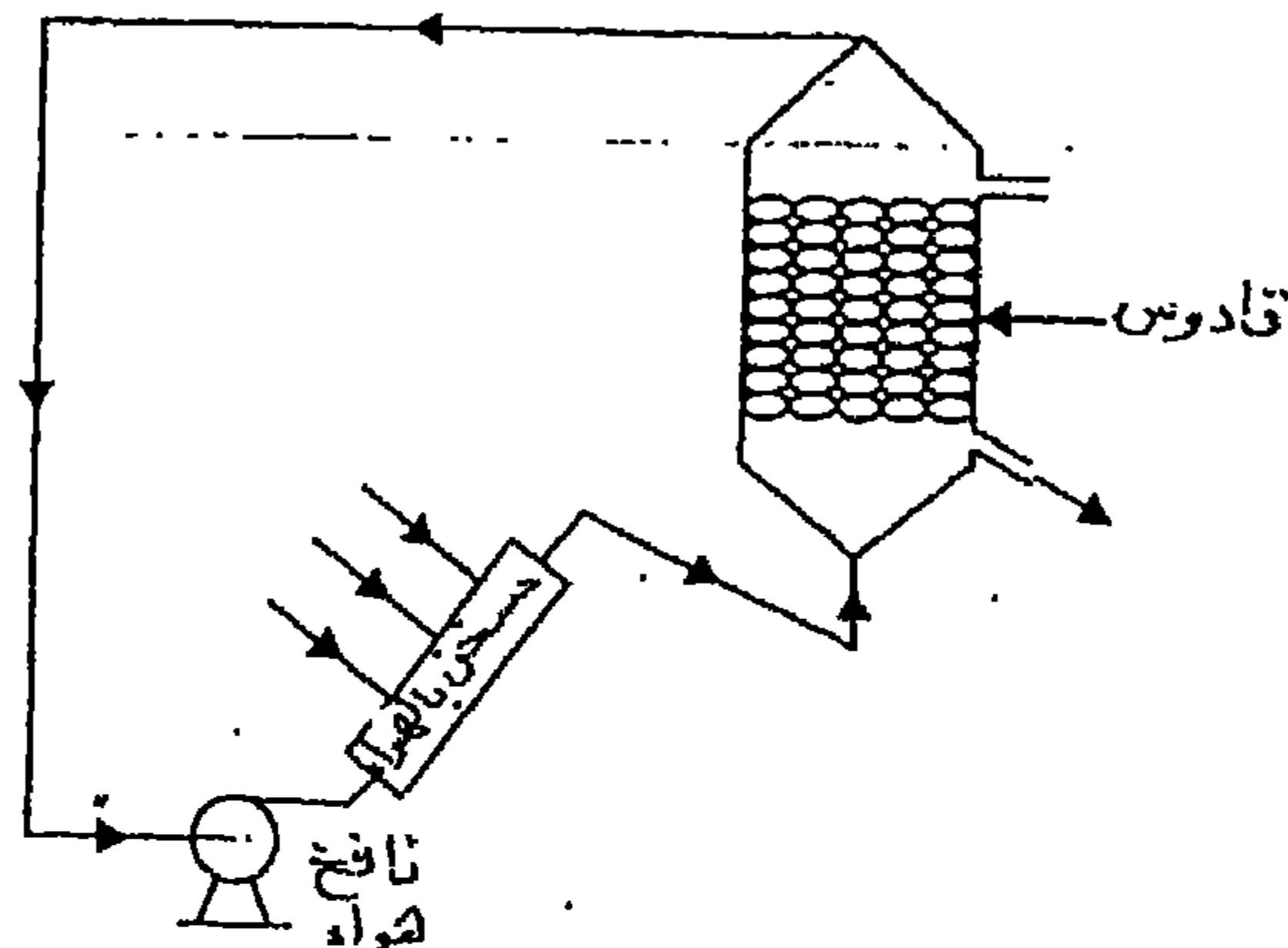


شكل ( ٣ - ١٨ )

مجفف على شكل غرفة صغيرة

ويبين شكل (٣ - ١٨) مجففاً فى شكل غرفة صغيرة، وهو يتكون من حيز مقفل ذى غطاء شفاف، وتوضع المادة المراد تجفيفها فوق صينية مثقبة، ويمتص الإشعاع الشمسى الذى ينفذ لداخل الحيز بداخل المنتج نفسه، وكذلك بأسطح الحيز المغلق الداخلية المحيطة، ونتيجة لذلك تطرد الرطوبة من المنتجات فى حين يسخن الهواء الداخلى، وتكفل الفتحات الملائمة الموجودة بالقاع والسقف دوران تيارات الحمل الطبيعية، وتتراوح درجة الحرارة التى يمكن الحصول عليها عموماً ما بين ٥٠، ٨٠° وتتراوح فترة التجفيف ما بين يومين وأربعة أيام، و تجفف الأعشاب وغيرها من نوعيات المنتجات بهذه الطريقة.

أما فى المجفف من نوع التيارات الاصطناعية فيستعمل نوع من نافخات الهواء الكهربائية أو الميكانيكية فى تحريك الهواء داخل الحيز، ولعمليات التجفيف على نطاق كبير يستعمل مجفف بتيارات الحمل مثل الموضح بشكل (٣ - ١٩)، وفيه يسخن الهواء منفصلاً فى مسخن شمسى ثم يدفع فى مجار إلى الغرفة التى يخزن فيها المنتج المراد تجفيفه، ويصلح هذا النوع من المجففات مع حبوب المحاصيل الغذائية والكثير من المنتجات الأخرى كالشاي والتوباكو، وهى أسرع وذات كفاءة حرارية أعلى.



شكل (٣ - ١٩)

مجفف بتيارات حمل اصطناعية

## تحلية المياه (إزالة الملوحة) بالطاقة الشمسية:

مياه الشرب حاجة أساسية لكل الأفراد، ولا تتاح المياه الصالحة للشرب فى كثير من بلدان العالم.

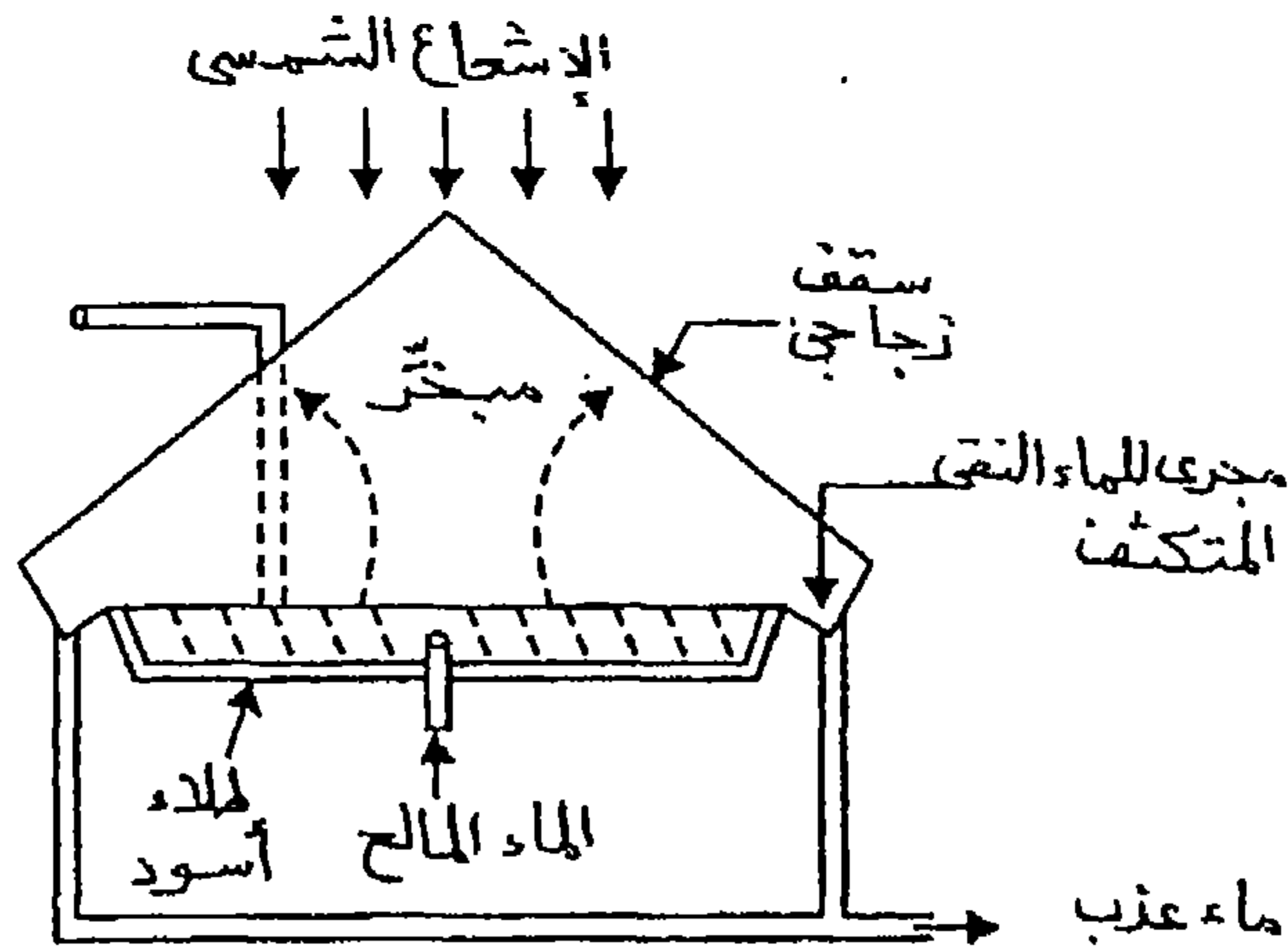
وتسمح الطاقة الشمسية فى حالة توافرها باستعمالها فى التزويد بمياه الشرب، وباستخدام المعدة المعروفة باسم جهاز التقطير الشمسى solar still يمكن إزالة الملوحة من الماء غير النقى عن طريق الطاقة الشمسية.

والتحلية بالطاقة الشمسية والقائمة على أساس تقنية المجمع ذى الصفائح المسطحة تستخدم لتحويل المياه العكرة ومياه البحر إلى مياه صالحة للشرب، وفى تقنية التقطير الطبيعى بالشمس، يتبخر الماء بفعل الطاقة الشمسية ويتكثف بصورة طبيعية فى صورة صالحة للشرب، وهى تقنية ملائمة لإمداد المناطق الساحلية والأجزاء الكبيرة المنعزلة التى لا يصلح ماؤها للشرب، والماء المقطر من جهاز التقطير الشمسى يمكن استعماله بالمثل فى تغذية الحاشدات (البطاريات).

ويتكون جهاز التقطير الشمسى من النوع التقليدى (شكل ٣ - ٢٠) من حوض ضحل معزول (وأحياناً غير معزول) مبطن أو مطلى بمادة سوداء مضادة للماء يحتوى على ارتفاع غير عميق (من ٥ إلى ٢٠ سم) من الماء المالح أو قليل الملوحة المطلوب تقطيره، والحوض مغطى بلوح مفرد أو مزدوج من الزجاج أو البلاستيك مدعم بإطار مناسب محكم الغلق بحيث يقلل من تسرب البخار، ويمتد مجرى الماء المتكثف بطول الحافة السفلى للغطاء الزجاجى أو البلاستيكى ويتجمع به الماء المقطر فيحمله إلى خارج جهاز التقطير، وتستعمل ماسورة لملء الحوض بالماء المالح وأخرى للتحكم فى منسوب الماء المالح وتستخدم بالمثل فى إغراق المحلول الملحى بالماء، ويمكن أن يغذى جهاز التقطير بالماء المالح بصفة مستمرة



أو متقطعة، إلا أن معدل التغذية يحافظ عليه عمومًا عند ضعف معدل الماء المقطر الناتج في الجهاز، إلا أن الأمر يعتمد على درجة الملوحة الابتدائية، وتعتمد نسبة مقدار الماء المالح وماء الغمر على ملوحة ماء الحوض، وقد وجد أنها تتناسب مع مقدار الماء العذب المنتج، ويشيد جهاز التقطير في منطقة مكشوفة بحيث يواجه محوره الطولى الاتجاه الشرقى - الغربى.



شكل ( ٣ - ٢٠ )

رسم تخطيطى لجهاز تقطير شمسى من نوع الحوض الضحل

وفي أثناء عملية التقطير يمتص الإشعاع الشمسى - بعد نفاذه خلال الغطاء الشفاف - داخل الماء والحوض، فترتفع درجة حرارة الماء مقارنة بالغطاء، ويفقد الماء الحرارة نتيجة التبخر وتيارات الحمل والإشعاع إلى الغطاء، ونتيجة التوصيل خلال أرضية الجهاز وحوافه. ويزيد الماء المتبخر من الحوض، من محتوى الرطوبة داخل الجهاز، وفي نهاية المطاف يتكثف على الوجه الداخلى للوح الزجاجى وينزلق لأسفل صوب مجارى التكثف ومنها إلى خارج الجهاز للاستعمالات المختلفة.

وأجهزة التقطير الشمسي ذات السعات النمطية تغل من ٢ - ٤ لترات من الماء المقطر في اليوم لكل متر مربع من المساحة، والاستعمال المثالي لها في مجموعات كبيرة قادرة على إمداد المناطق النائية بماء الشرب، والماء اللازم لشحن البطاريات، وللمراكز الصحية الصغيرة والعيادات الطبية وما إلى ذلك، ولما كانت أجهزة التقطير هذه تعمل على أساس الفرق في ضغوط البخار بين الجو وسطح الماء، فإنها تعطي مردودًا أعلى في المناخ الجاف، وقد وجدت لها إنتاجية طيبة حتى في الأجواء شديدة البرودة مثل إقليم "لاداخ" بالنظر لانخفاض رطوبة جوه.

### أجهزة الطهي الشمسية:

يشبه جهاز الطهي الشمسي، ذلك الذي اعتدنا على استعماله في مطابخنا لطهي الطعام، فيما عدا أنه لا يحتاج لأي نوع من الوقود كالخشب أو أقراص الروث أو غاز الطهي، أو الفحم أو الكيروسين أو غيرها، فهو يعمل بالطاقة الشمسية فحسب، ولا يخلف جهاز الطهي الشمسي أي دخان أو رماد، مما يحافظ على نظافة البيئة، كما أنه يوفر مصادر الطاقة التقليدية الثمينة للبلاد علاوة على مردوده الاقتصادي.

### نظرية عمل جهاز الطهي الشمسي:

تنقسم أجهزة الطهي الشمسي إلى فئتين:

أ - النوع ذو الصندوق الساخن: وفيه يستغل الجهاز الطاقة الحرارية الشمسية بدون تركيز للأشعة أو بتركيز قليل.

ب - أجهزة طهى توجه الطاقة الشمسية (أشعة الشمس) من سطح عريض إلى مساحة أصغر، ومن ثم لدرجة حرارة أعلى.

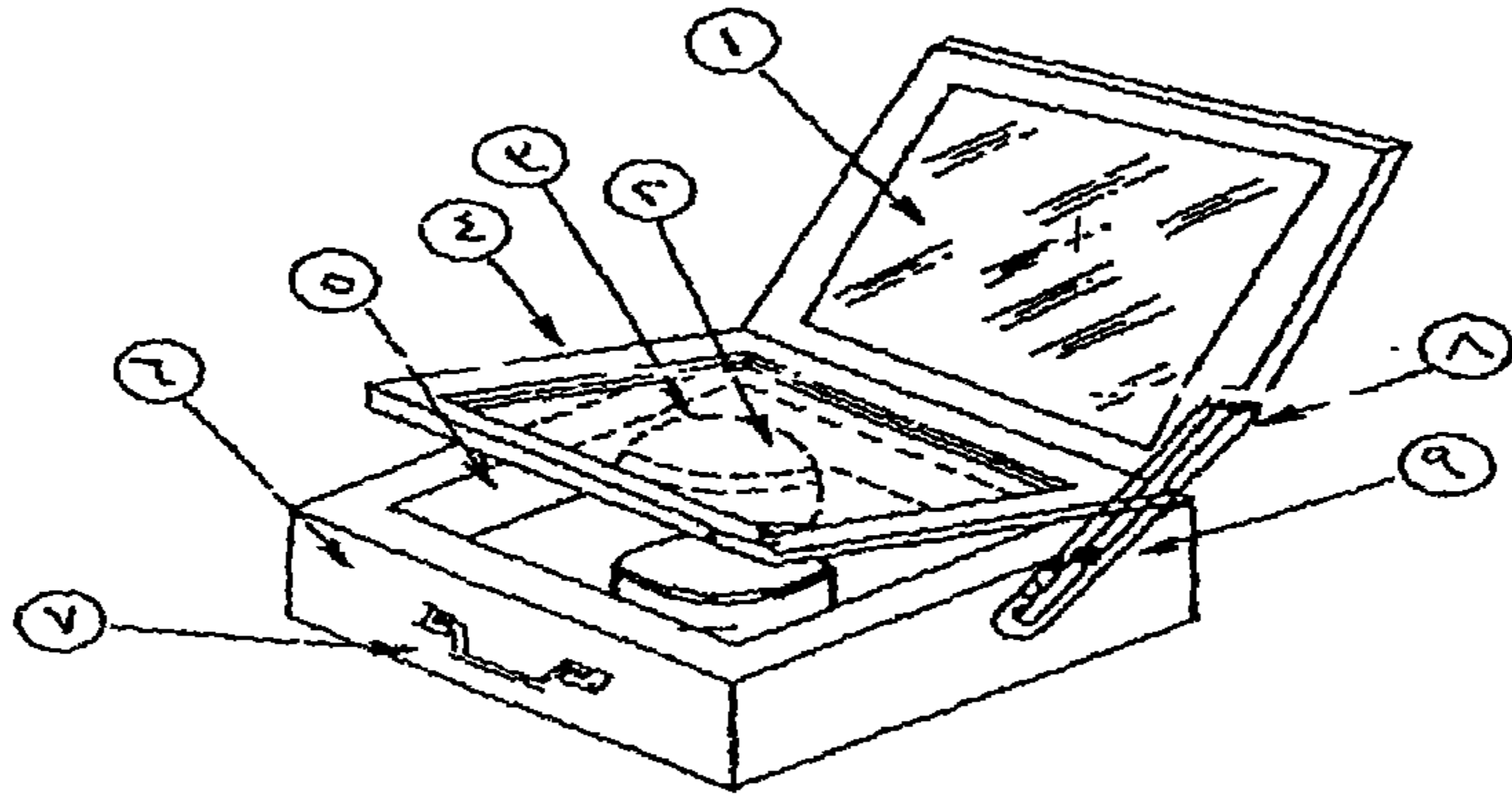
ويتركب جهاز الطهى الشمسى ذو الصندوق الساخن من صندوق معزول جيداً، ومطلى من الداخل بطلاء أسود غير لامع، وله غطاء شفاف (ذو جدار مفرد أو مزدوج) يحفظ الحرارة داخل الجهاز (شكل ٣ - ٢١) ويسمح هذا الغطاء بالإشعاع الحرارى من الشمس أن ينفذ إلى الداخل، ولكنه لا يسمح للحرارة بأن تتسرب من خلال السطح الممتص الأسود الساخن إلى خارج الصندوق، وبفضل هذا التصميم ترتفع درجة الحرارة داخل الصندوق بسبب السطح الأسود المطلى إلى ١٤٠ م تكفى لعمليات الطهى.

ويستخدم النوع الثانى من أجهزة الطهى الشمسى عدسة أو عاكساً يلائم تصميمه تركيز الإشعاع الشمسى (أشعة الشمس) فى مساحة صغيرة، وبوسع هذا الجهاز أن يصل لدرجات حرارة أعلى لسطحه الممتص إذا أحسن تصميمه، إلا أن هذا النوع من أجهزة الطهى يفوق فى تكاليفه الأجهزة ذات الصندوق الساخن.

**وصف تركيب جهاز الطهى الشمسى ذو الصندوق الساخن:**

**يتكون الجهاز من الأجزاء الآتية:**

- |                      |                             |
|----------------------|-----------------------------|
| ١ - الصندوق الخارجى. | ٢ - الصندوق الداخلى.        |
| ٣ - العازل الحرارى.  | ٤ - الغطاء الزجاجى المزدوج. |
| ٥ - مرآة.            | ٦ - أوعية الطهى.            |



شكل (٢١-٣)

١ - مرآة مستوية ٢ - وعاء الطهي ٣ - لوح زجاجي ٤ - الغطاء

٥ - مادة عازلة (زجاج) ٦ - الصندوق الخارجي ٧ - مقبض

٨ - حامل المرآة ٩ - دليل ضبط بمفصلة

(١) الصندوق الخارجي: يكون لصندوق جهاز الطهي الشمسي الخارجي تصميم وأبعاد ملائمان ويصنع من الخشب أو الألواح الحديدية أو البلاستيك المقوى بالألياف.

(٢) الصندوق الداخلي: يمكن أن يصنع الصندوق الداخلي من الحديد المجلفن أو ألواح من الألومنيوم الكربوني، وتطلى جوانبه الداخلية وأرضيته المعرضة للشمس بطلاء أسود غير لامع (عادة ما يستخدم الطلاء المستعمل للسبورات).

(٣) العازل الحراري: يملأ الفراغ ما بين الصندوقين الخارجي والداخلي بمادة عازلة مثل الصوف الزجاجي أو الترموكول Thermocole وما إلى ذلك، لمنع الفاقد الحراري من جهاز الطهي.

٤) الغطاء الزجاجى المزدوج: يزود جهاز الطهى الشمسى بغطاء زجاجى مزدوج، ولمثل هذه الأغطية أبعاد أكبر قليلا من الغطاء الداخلى، وتثبت فى إطار خشبى يحفظ فراغا صغيرا بين الطبقتين الزجاجيتين، وهذا الفراغ البينى يحتوى على هواء يعمل كعازل ومانع لتسرب الحرارة. ويتصل الإطار الخشبى بالصندوق الخارجى بمفصلات ويحفظ فراغا صغيرا بين الطبقتين الزجاجيتين وهذا الفراغ وهناك شريحة مطاطية مثبتة حول حواف هذا الإطار لمنع أى تسرب حرارى.

٥) المرآة: تستعمل مرآة مستوية بسيطة فى جهاز الطهى الشمسى لزيادة الإشعاع الشمسى الوافد على السطح الممتص، وتنعكس أشعة الشمس الساقطة على المرآة منها وتدخل الصندوق بعد مرورها خلال الغطاء الزجاجى المزدوج، ويمكن لهذه المرآة أن تزيد من الإشعاع الشمسى الوافد إلى الجهاز بنسبة ٥٠% تقريبا.

٦) أوعية الطهى: تصنع أوعية الطهى المغطاة عامة من الألومنيوم، وأحيانا من الصلب الذى لا يصدأ، وتطلى الأسطح الخارجية للأوعية بطلاء أسود غير لامع بحيث تمتص الإشعاع مباشرة.

### مزايا أجهزة الطهى الشمسى:

لأجهزة الطهى الشمسى عدد من المزايا مقارنة بأجهزة الطهى التقليدية نجملها فيما يلى:

- ١) يمكنها طهى أربعة أو خمسة أصناف فى ذات الوقت.
- ٢) مع درجة حرارة الطهى المنخفضة، تحافظ هذه الأجهزة على القيمة الغذائية للأطعمة.

(٣) لا تحتاج إلى مراقبة مستمرة.

(٤) توفر الوقود.

(٥) توفر النقود.

(٦) خالية من التلوث.

(٧) آمنة.

(٨) توفر الوقت لربة المنزل.

(٩) تحافظ على البيئة.

(١٠) تحتفظ بالطعام ساخناً لمدة طويلة.

### محاذير استخدام أجهزة الطهي الشمسية:

رغم ما لها من مزايا متعددة تحد العوامل الآتية من استخدام أجهزة الطهي الشمسية:

(١) لا يمكن استخدامها ليلاً.

(٢) لا تعمل جيداً في الجو ذى السحاب، ولكنها في كثير من الأحيان تحتفظ بحرارتها بما يكفي لبقاء الأطعمة ساخنة.

(٣) لا يمكن استعمالها في إعداد كميات ضخمة من الأطعمة.

(٤) لا يمكن استعمالها في القلى.

### الأصناف التى تطهى فى الأجهزة الشمسية:

هناك عدد كبير من الأصناف التى يمكن طهيها فى الأجهزة الشمسية مما يشيع فى حياتنا اليومية مثل:

١ - الأرز، الكيتشيري(\*)، البولاو(\*\*)، الأرز المحلى... إلخ.

٢ - كل أنواع الدال(\*\*\*) .

٣ - جميع أصناف الحبوب الغذائية Cereals .

٤ - جميع أصناف الخضروات .

٥ - الخبز والكعك والبسكويت... إلخ.

٦ - الإيدلى(\*\*\*\*) والدهوكلا(\*\*\*\*\*) والهاندفا(\*\*\*\*\*)... إلخ.

٧ - المخللات وأصناف المربى... إلخ.

### الأوقات اللازمة للطهى فى الأجهزة الشمسية:

تستغرق الأجهزة الشمسية ما بين ساعتين وثلاث ساعات لطهى المواد الغذائية اعتمادًا على المناخ وعلى نوع الطعام، ويقل الوقت اللازم صيفًا عنه فى الشتاء.

---

(\*) الكيتشيري Kichri: طعام من الأرز والعدس (المترجم)

(\*\*) البولاو Pulae: طبق آسيوى يحمر فيه الأرز أو القمح فى الزيت حتى يتحول لونه إلى البنى بتقليبه مع البصل المحمر (المترجم)

(\*\*\*) الدال dal: طعام يجهز من الفول المجفف والعدس وغيرها ويؤكل عادة مع الأرز والخضروات (المترجم)

(\*\*\*\*) الإيدلى idli: كعكة هندية من العدس والأرز تؤكل عادة فى الإفطار (المترجم)

(\*\*\*\*\*) الدهوكلا dhokla: طبق شهير فى غرب الهند مكون أساسًا من الدقيق البنغالى (المترجم)

(\*\*\*\*\*) الهاندفا handva: وجبة مكونة من الأرز والدال والفول (المترجم)

نوع الطعام	المدة اللازمة للطهى
١ - الخضروات	١ ساعة
٢ - الأرز - المنج... إلخ	١,٥ ساعة
٣ - الخبز - البسكويت، الكعك... إلخ	ساعتان
٤ - الحبوب الغذائية	٢ - ٣ ساعات

### تعليمات الطهى:

من الضروري مراعاة النقاط التالية عند الطهى فى الأجهزة الشمسية:

- (١) استعمل الحد الأدنى من المياه اللازمة لعملية الطهى.
- (٢) ينبغى تقطيع الخضروات إلى قطع صغيرة، ولا حاجة لإضافة المياه فى طهى الخضروات.
- (٣) فى وقت الطهى احتفظ بالوعاء وغطاؤه مغلق.
- (٤) لا يجب أن يتعدى منسوب الماء ومحتويات الإناء نصف ارتفاعه.
- (٥) بمجرد وضع الإناء داخل الصندوق، لا ينبغى رفع الغطاء.
- (٦) بعد عملية الطهى نظف الجهاز وجففه بقطعة من القماش ثم أغلقه.
- (٧) بعد الانتهاء من عملية الطهى اكشف الغطاء بالكامل.



المتاعب المحتملة مع أجهزة الطهي الشمسية:

المشكلة	الأسباب	العلاج
عدم الوصول إلى درجة الحرارة المتوقعة أو عدم إتمام عملية الطهي	<p>أ- تآكل الطلاء الأسود أو تقشره</p> <p>ب- انكسار الغطاء الزجاجي</p> <p>ج- انكسار المرآة أو رداعتها</p> <p>د- تسرب الحرارة من جهاز الطهي</p> <p>هـ- عدم إحكام اللوح الممتص</p> <p>و- تجمع ذرات من الغبار فوق السطح الزجاجي</p> <p>ز- عدم نظافة السطح الممتص لجهاز الطهي</p> <p>ح- تكرار فتح الغطاء</p>	<p>أ- اطل السطح الممتص ووعاء الطهي بطلاء سبورة أسود غير براق</p> <p>ب- استبدل الغطاء الزجاجي.</p> <p>ج- استبدل المرآة أو اطلها بطلاء فضي</p> <p>د- اعثر على موضع التسرب واستبدل مادة العزل</p> <p>هـ- ضع جهاز الطهي بطريقة سليمة بحيث يسقط أكبر قدر من الإشعاع على السطح الممتص</p> <p>و- نظف زجاج الغطاء بالقماش</p> <p>ز- نظف السطح الممتص بقطعة من القماش</p> <p>ح - لا تكشف الغطاء بعد وضع المواد الغذائية داخل الجهاز</p>

## **الباب الرابع**

### **معدات تجميع الطاقة الشمسية**



## مقدمة:

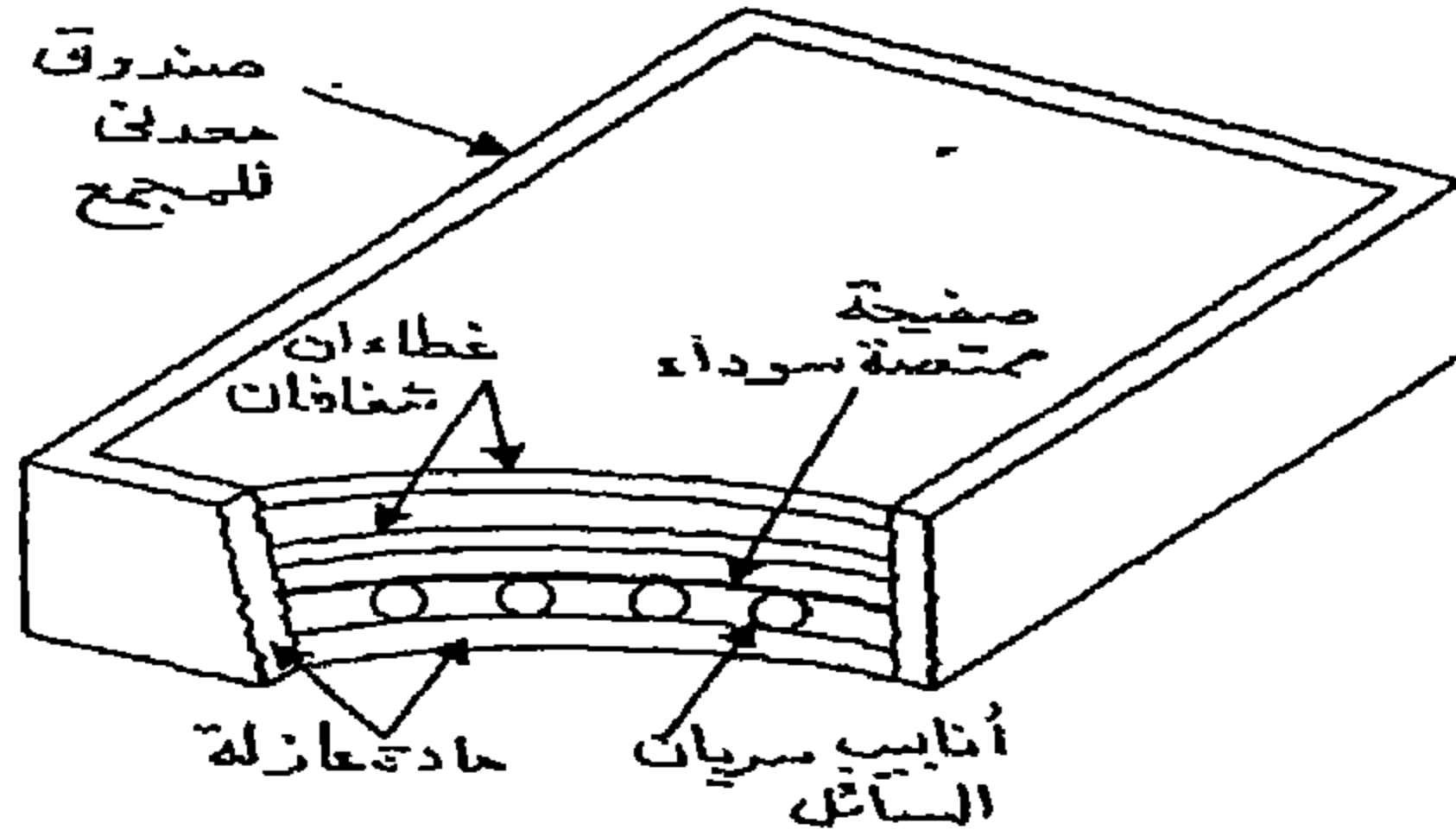
معدات تجميع الطاقة الشمسية هي مبادلات حرارية تحول الإشعاع الشمسي إلى طاقة داخلية في المادة الناقلة الوسيطة، وهناك نوعان من مجمعات أشعة الشمس: المجمعات ذات الصفائح المسطحة، والمجمعات بالتركيز. ومساحة المجمع ذي الصفائح المسطحة هي نفسها المساحة المعرضة للإشعاع الشمسي وهي نفس المساحة التي تمتص، أما المجمع بالتركيز فله عادة سطوح مقعرة عاكسة تتعرض لأشعة الشمس وتركزها نحو بقعة أصغر مساحة تتلقاها، مما يرفع من فيض الإشعاع.

والطاقة الشمسية متاحة خلال ٦ - ٨ ساعات من النهار وإن اختلفت خلالها شدتها ما بين الصباح والمساء، ويتراوح مقدار الطاقة الشمسية التي يستقبلها سطح مستو في اليوم ما بين ٥، ٧,٥ كيلووات ساعة لكل متر مربع في أغلب مناطق الهند، وعلى أية حال فيعتمد المقدار الكلي على الفصل المناخي من العام وعلى حالة السماء خلال أوقات النهار، وكمتوسط عام يصل عدد الأيام الصافية نحو ٣٠٠ يوم على مدار السنة في معظم نواحي البلاد، وعلى ذلك يتلقى كل متر مربع في المتوسط ١٥٠٠ كيلو وات ساعة من الإشعاع الشمسي سنوياً، وهو مقدار هائل من الطاقة.

وتوفر الطاقة الشمسية أفضل الفرص للاستعاضة عن الوقود الأحفوري، وعلى سبيل المثال، فمنظومة تسخين مياه ذات سعة ١٠٠ لتر يمكنها أن توفر - على الأقل - ٢١٣٨ كيلو جراماً من الخشب أو ٢٢٣٠ كيلو وات ساعة من الطاقة الكهربائية سنوياً، وعلى ذلك فهناك مجال واسع لاستتقاذ الوقود الأحفوري من خلال استعمال معدات التسخين بالشمس.

## المجمعات المسطحة للطاقة الشمسية:

يصور شكل (٤ - ١) رسمًا لمجمع طاقة شمسية مسطح، وفيه يمر الإشعاع الشمسي خلال الغطاء الشفاف أو الأغشية الشفافة فيصطدم بالصفحة المطلية بالسواد ذات الامتصاصية<sup>(\*)</sup> العالية، فيتم امتصاص جزء كبير من الطاقة بواسطة الصفحة وينتقل إلى المادة الوسيطة في أنابيب سريان المائع التي تحمله بعيدًا في صورة طاقة قابلة للاستعمال، والسطح السفلي لصفحة الامتصاص وجوانب الصندوق الخارجى معزولان جيدًا، بما يكفل التقليل من الفاقد بالتوصيل الحرارى، والوسط الناقل إما سائل أو غاز (الماء أو الهواء عادة) وشكل (٤ - ١) يمثل مجمعًا مسطحًا للطاقة الشمسية ذا وسط ناقل سائل.



(شكل ٤ - ١)

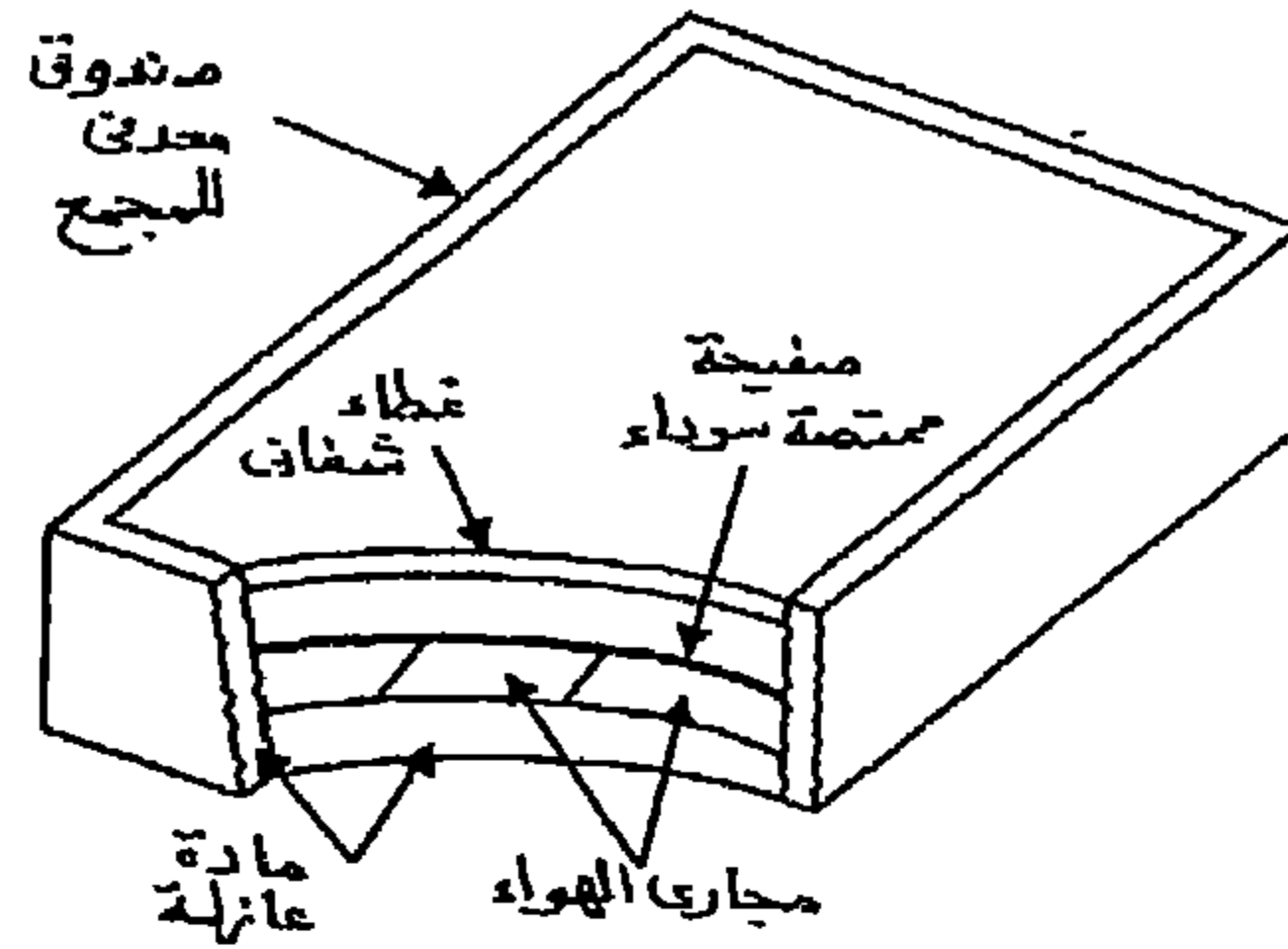
مجمع مسطح للطاقة الشمسية بوسط ناقل سائل

---

(\*) الامتصاصية أو القابلية للامتصاص absorptivity هي نسبة الإشعاع الذى يمتصه السطح من الإشعاع الكلى الساقط عليه (المترجم)

ومن الممكن أن تلحم أنابيب السائل بصفحة الامتصاص، ويمكن أن تكون جزءًا متكاملًا مع الشريحة، وتتصل أنابيب السائل ببعضها عند كلا الجانبين بأنبوبة تجميع كبرى header.

وفي حالة مجمعات الطاقة الشمسية المسطحة التي يستعمل فيها الهواء (شكل ٤ - ٢) يسرى الهواء أسفل صفحة الامتصاص، بحيث يتلامس مع كل سطحها تقريبًا للرفع من كفاءة عملية الانتقال الحرارى، ويستعمل الغطاء الشفاف للتقليل من الفاقد بتيارات الحمل خلال طبقة الهواء الساكن ما بين صفحة الامتصاص والزجاج، كما أنه يقلص من الفاقد بالإشعاع من المجمع، حيث إن طيف قابلية الزجاج للانتقال خلاله شفاف بالنسبة لموجات الإشعاع القصيرة المنبعثة من الشمس، والتي تعكسها السماء فى حين أنها معتمة تقريبًا بالنسبة لموجات الإشعاع الحرارى الطويلة المنبعثة من أسطح المجمع الداخلية.



(شكل ٤ - ٢)

مجمع مسطح للطاقة الشمسية بوسط ناقل غازى (هواء)

ولدى استعمال غطاءين شفافين أو أكثر، يقل أكثر وأكثر الفاقد بالإشعاع والحمل... وتلعب الأغشية الشفافة دورًا له أهميته فى تقليص الفاقد الحرارى من المجمع، كما أنها تعمل على إنقاص فقدان الإشعاع الداخلى الساقط على صفحة

المجمع، وعند مستويات درجات الحرارة المنخفضة والمتوسطة غالبًا ما يستخدم مجمع مزجج glazed مفرد يعطى كفاءة أعلى من مجمع مزجج ثنائى double glazed.

وعادة ما تكون المجمعات المسطحة مثبتة فى موضعها فى غير ما حاجة إلى توجيهها صوب أشعة الشمس، وينبغى أن توجه رأسا نحو خط الاستواء المواجه للشمال (فى نصف الكرة الأرضية الجنوبي) أو المواجه للجنوب (فى نصف الكرة الشمالى) وللاستخدامات المستمرة على مدار العام تساوى زوايا الإمالة tilt angle، الأكثر ملاءمة، زاوية خط العرض، وفى الشتاء يتوجب أن تزيد زاوية الميل على زاوية خط العرض بحوالى ١٠ - ١٥ درجة، فى حين ينبغى أن تقل عنها - صيفاً - بنفس المقدار، وليس لزاوية الميل المثلى للسطح ولا سمت السطح تأثير بالغ، فانحراف قدره نحو ١٠ درجات عن القيم المثلى لا ينجم عنه إلا نقصان طفيف فى الطاقة السنوية المتاحة.

وتفيد المجمعات ذات الصفيحة المسطحة فى الإمداد بالطاقة الحرارية فى نطاق درجات الحرارة المعتدلة وحتى درجة غليان الماء الطبيعية (١٠٠ م°)، وبالوسع تخفيض فواقد الإشعاع من صفيحة امتصاص مجمع الطاقة الشمسى بصورة ملموسة حين يكون للسطح الماص خواص إشعاع انتقائية، ولهذه الأسطح الانتقائية قابلية امتصاص عالية فى نطاق الأطوال الموجية للإشعاع الشمسى، وقابلية منخفضة للانبعاث عند الإشعاع الحرارى ذى الموجات الطويلة.

وليس متاحًا فى الطبيعة مادة ذات خواص انتقائية، بل تصنع الأسطح الانتقائية البسيطة من طبقة بالغة الرقة من أكسيد معدنى أسود يطللى به سطح أصلى من معدن لامع، وسمك الطلاء الأسود يكفل له أن يكون ماصًا جيدًا لطاقة الشمس، ومعدن الأساس اللامع قليل القابلية لبعث الإشعاع الحرارى، كما أن طبقة الطلاء الرقيقة شفافة لهذا الإشعاع، وهاتان الصفتان تقللان من الإشعاع الحرارى،

والأسطح الانتقائية ذات الفاعلية تبلغ امتصاصيتها زهاء ٩٥% وانبعاثيتها نحو ١٠%.

وبالإمكان تقليص الفواقد بالانعكاس من غطاء مجمع الطاقة الشمسية الزجاجي بدرجة ملموسة بإضافة طبقة سطحية رقيقة ذات معامل انكسار يقع وسطاً بين معامل الانكسار في الزجاج والهواء، ويمكن إجراء معالجة حرارية للسطح بغمر الزجاج في محلول حامض الفلوسيلييك *fluosilicic acid* المشبع بالسليكا لتخليق طبقة رقيقة على السطح من السليكا المسامية، ومن شأن مثل هذه المعالجة أن تقلل فاقد الانعكاس الشمسي من مستواه المعتاد (٨%) في ظروف سقوط الأشعة الاعتيادية على الزجاج العادي) إلى ١% عند استخدام طبقة مزدوجة.

ويجري التحكم في امتصاص الزجاج للإشعاع من خلال الشوائب من أكسيد الحديد المتواجدة بالزجاج، كما تتحكم نسبة الحديد المحتوى في لون الزجاج حين مشاهدته من عند الحافة، فزجاج النوافذ العادي يبدو ذا اخضرار، ومثل هذا اللوح الزجاجي قد يمتص ما بين ٥، ١٠% من الضوء الساقط، وعلى الجانب الآخر يمتص لوح الزجاج (الأبيض) الذي يحتوي نسبة منخفضة من الحديد أقل من ١% من الضوء الساقط.

### أنواع الطلاء الأسود:

من أجل تحويل الإشعاع الشمسي الساقط على منظومة الامتصاص إلى حرارة ينبغي طلاء المجمع بطلاء أسود اللون أو أية مادة شبيهة أخرى. والطلاء الأمثل للمجمع، هو ذلك الذي يمتص أغلب الإشعاع الساقط عليه، ولا ينبعث منه شيء في نطاق الموجات الطويلة من الطيف الكهرومغناطيسي. وتمتص مواد الطلاء السوداء المستعملة عادة حتى ٩٥% من الإشعاع الشمسي الساقط، بيد أن



انبعاثيتها في درجات الحرارة العالية تتجاوز بالمثل ٩٠ %، وهو ما يعنى فاقدًا هائلًا في الحرارة، لا يسمح لهذه الممتصات بالوصول إلى درجات أعلى من ١٢٠-١٣٠ م. ومن ثم فليس بالإمكان استعمال مثل هذه المجمعات في التطبيقات فوق درجة ٦٠-٦٥ م، إذ أن كفاءتها تتدنى بشدة فوق هذا النطاق. والنوع الآخر من مواد الطلاء المسماة بالمواد الانتقائية ذو امتصاصية عالية وانبعاثية منخفضة حتى فوق ١٠٠ م، ومن هنا كان استعمالها لتسخين الماء لما فوق ٧٠ م.

ولابد أن تتمتع مادة الطلاء بخاصية الالتصاق وبمقاومة عالية للتقلبات في درجات الحرارة ونسب الرطوبة، وكذلك في شدة الإشعاع الساقط.

### تزجيج المجمع Collector Glazing

للغطاء الشفاف فوق مادة المجمع الممتصة، وظيفة السماح للإشعاع الشمسي بالنفاذ خلاله، كما يقوم بدور الستار المعتم بالنسبة للإشعاع المنبعث من الممتص الساخن. وعلاوة على ذلك فإنه يتجنب أو يقلل من الفاقد الحراري بالحمل من صفيحة الامتصاص.

والتزجيج الأمثل للممتص يجب أن تكون له السمات الآتية:

- (١) الحد الأقصى من النفاذية Transmissivity للإشعاع الشمسي (من ٠,٣ إلى ٢ ميكرون).
- (٢) الحد الأدنى من النفاذية للإشعاع ذي الموجة الطويلة (أطول من ٢ ميكرون)
- (٣) توصيلية حرارية Conductivity منخفضة.
- (٤) مقاومة عالية لظروف الطقس.

والزجاج المطاوع هو مادة ممتازة لآخر طبقات التزجيج من الخارج. وعملية التطويع لازمة لإضفاء المتانة المطلوبة. والزجاج مادة طويلة العمر، شديدة التحمل ومقاومة عالية جدا لعوامل الطقس. ويوصى باستعمال الزجاج ذو المحتوى المنخفض من الحديد في تطبيقات الأجهزة الشمسية.

### النفاذ خلال الغطاء:

يتوقف مقدار الطاقة الشمسية التي تمر خلال الغطاء على الخواص الفيزيائية للمادة المستعملة وعلى درجة نظافة سطحه.

#### أ - الغطاء الزجاجي:

ينفذ لوح نظيف من زجاج النوافذ العادي زهاء ٨٤% من الطاقة الساقطة على سطحه، وأحيانا ما يختار زجاج ذو محتوى منخفض من الحديد، فهو أقل امتصاصا للإشعاع، ويتسم الزجاج عالي المحتوى من الحديد (وبالتالى ذو النفاذية الأقل) بدرجة من الاخضرار فى لونه، والزجاج المطاوع مادة ممتازة لصناعة آخر طبقات التزجيج من الخارج.

#### ب - الأغشية البلاستيكية:

يمكن لبعض المواد البلاستيكية كالأكريليك النقى، والبي فى سى (\*) والجي آر بى (\*\*\*) أن تنفذ من الطاقة مثل ما ينفذه الزجاج بل وأكثر. إلا أن العديد منها يفشل فى إحداث الاحتباس الحرارى (تأثير الدفيئة) لأنها لا تنفذ فقط الطاقة الشمسية، بل وكذلك الطاقة ذات الموجات الطويلة التى تشع من الممتص مرة

---

(\*) بي فى سى PVC: اختصار لاسم مادة (الكلور متعدد الفينيل Polyvinyl chloride) (المترجم)

(\*\*) جي آر بي G R P: اختصار لعبارة Glass reinforced plastic أى البلاستيك المقوى بالزجاج (المترجم)

أخرى عندما يسخن، ولا تمثل المواد البلاستيكية بحال أى توفير فى التكلفة لدى مقارنتها بالزجاج، وقد يؤدي ترقيق سمك الطبقات إلى صعوبات فى تركيبها، وقد نجمت مشاكل بالفعل فى الماضى من جراء تآكل الطبقات البلاستيكية بفعل الرياح وبالتالى زيادة الفاقد من الحرارة بالحمل، وربما يشيع فى المستقبل استعمال طبقة من التدار tedlar<sup>(\*)</sup> مع لوح من البوليستير الصلد معاً، إلا أنها لن تكون أرخص من الزجاج وإن تكن تتيح لمصنعيها إمكانية نقل المجمعات المغطاة.

### الترجيح المزدوج Double Glazing:

أحياناً ما تستعمل طبقتان من الزجاج لتقليل الفاقد الحرارى من الشريحة الماصة، بيد أن هذا على كل حال يقلص من مقدار طاقة الإشعاع الشمسى الذى يصل للمجمع، ومن شأن طبقة من الزجاج سمكها ٤ ملليمتر أن تمرر ٧١% فحسب من الإشعاع الذى تتلقاه، والترجيح المزدوج مجد فقط فى ظروف الارتفاع الشديد فى الفقد الحرارى، والاحتياج إلى تسخين الماء لدرجة تزيد عن درجة حرارة الهواء الخارجى بأكثر من ٣٥° م، وفى حالة الترجيح لابد من إيلاء عناية خاصة لتثبيت الطبقة الداخلية، فهذه الطبقة ستعرض لدرجة حرارة أعلى، ولا بد لها من فراغ لتمدد فيه، وإلا لتشقق.

### تراكم القاذورات على غطاء المجمع:

من شأن تراكم الغبار على الغطاء أن يقلل من مقدار الطاقة المارة، ويمكن التقليل من حجم هذه المشكلة لأدنى حد باستعمال الزجاج الذى يتمتع بسطح أملس وصلد، إلا أن إمالة لوح الزجاج لمنع تراكم الغبار عليه قد يهبط بنفاذيته بحوالى

---

(\*) هو مادة فلوريد البوليفينيل، وهى مادة ذات احتمال وخاصة التصاق عاليين (المترجم)

٢٠% ما لم ينظف بصورة منتظمة، وتعتمد النسبة المضبوطة على مقدار الغبار والمواد الملوثة المتواجدة في الجو المحلي.

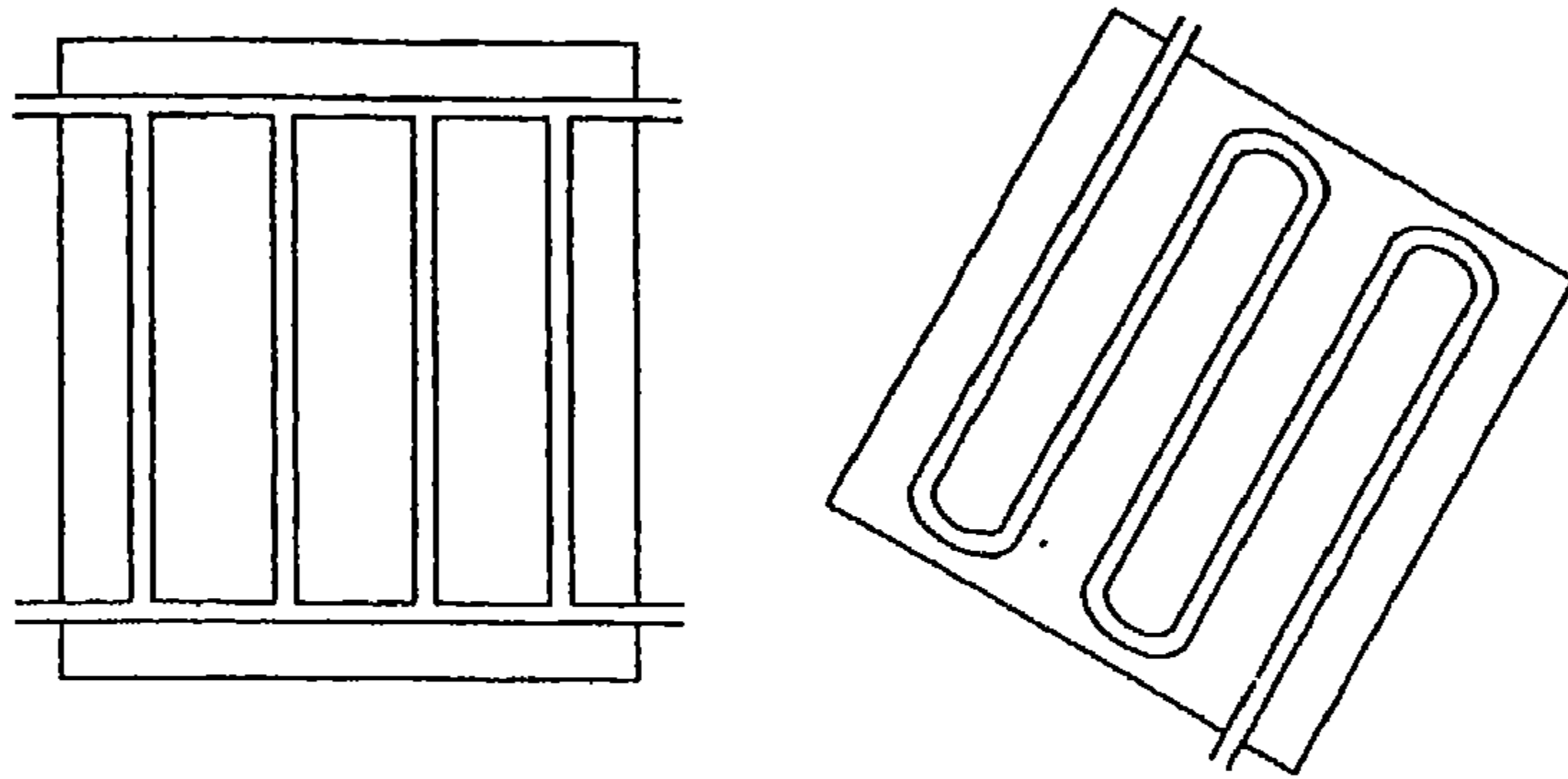
### عملية امتصاص سطح الصفيحة للإشعاع:

يزداد امتصاص الصفيحة للإشعاع بطلائها بسطح من مادة سوداء من خليط معدني خاص معالج بحيث يمتص بين ٨٠، ٩٨% من الإشعاع الواصل له، ولا بد أن يكون السطح ناعماً رقيق السمك حتى لا يشكل عائقاً أمام سريان الحرارة من الخارج إلى الداخل حيث تنتقل من هناك إلى تيار الماء المتدفق في دورته.

### الانتقال الحراري من المجمع إلى الماء:

يمكن تعزيز عملية انتقال الحرارة بتصنيع الصفيحة الممتصة من مواد ذات توصيلية حرارية عالية، وبزيادة سطح التلامس بين الماء وأنبوب الماء، وبين أنبوب المياه والصفيحة الممتصة، ويجذب في الوقت الحالي في المجمعات الشمسية، استخدام منظومة من الأنابيب والصفائح.

وباستخدام منظومة من الأنابيب والصفائح، تنبغي العناية في حسن اختيار المادة، والمسافات بين الأنابيب والوصلة ما بين الأنبوبة والصفيحة، وترتيب الأنابيب يتوقف بالمثل على نوعية المنظومة التي يستعمل فيها المجمع والشكل الأفعوانى أو المتعرج قد يسبب معاوقة زائدة للانسحاب في منظومة تعتمد على السريان بتأثير الجاذبية، في حين يفضى ترتيب الأنابيب في شكل متواز بين ماسورتى جميع، إلى مشاكل نتيجة الانسدادات بالهواء.



شكل (٤ - ٣)

(أ) مجمع من أنابيب وصفائح (ب) مجمع من أنابيب وصفائح

ذو أنابيب أفعوانية ملتوية بشبكة توزيع من أنابيب متوازية

ويتعين أن تسرى الحرارة في المجمعات ذات الصفائح والأنابيب في اتجاه عرضي لنقل الطاقة المتجمعة بالصفيحة الممتصة المستعرضة إلى الأنابيب الممتلئة بالماء، لذا فلا بد من استعمال المواد جيدة التوصيل الحرارى فقط.

ومن بين المواد المتوفرة عادة يمثل النحاس الأحمر أفضلها، فله تقريباً ضعف توصيلية الألومنيوم وزهاء ثمانية أضعاف توصيلية الصلب الطرى، وبالوسع زيادة توصيلية الألومنيوم والصلب للحرارة الممتصة بالتقريب بين الأنابيب، واستعمال صفائح أكثر سمكاً، فكلما ازداد سمك الصفيحة، قلت مقاومتها لسريان الحرارة خلالها(\*) .

والجدول الآتى يبين القيم المفضلة للسمك والمسافات بين الأنابيب في حالات المواد المختلفة:

(\*) طبقاً لما ورد بالنص المترجم الأسمى (المترجم)

مادة التصنيع	السك بالمليمتر	المسافة البيئية بالمليمتر
النحاس الأحمر	٠,٢٥	١٣٨
الألومنيوم	٠,٥٠	١٣٣
الصلب	١,٠٠	١٠٠

ولكى يتحقق تلامس جيد حرارياً بين الأنبوبة والصفحة ينبغي زيادة سطح التلامس إلى حده الأقصى، ويمكن إنجاز ذلك بتشكيل الصفحة بحيث تحيط بالأنبوبة، وبتشكيل الأنبوبة بغرض توفير سطح تلامس أكثر استواءً.

والجدول التالى يبين التوصيلية الحرارية لبعض المواد المستعملة فى صناعة صفائح الامتصاص:

مادة التصنيع	التوصيلية الحرارية وات / متر درجة كلفن
النحاس الأحمر	٣٧٦
الألومنيوم	٢٠٥
الصلب الطرى	٥٠
الصلب غير القابل للصدأ	٢٤

### العزل الحرارى للمجمع:

يتم عزل المجمعات الشمسية حرارياً بهدف تقليل فقد الحرارة من السطح الخلفى لمنظومة الامتصاص وجوانبها، وحيث إن المجمعات عرضة

للاستعمال أو البقاء فى درجات حرارة تبلغ نحو ٢٠٠ م°، فيجب ألا يبلى العازل الحرارى، أو ينبثق منه غاز أو يتمدد أو ينكمش فى نطاق درجات الحرارة بين ٣٠، ٢٠٠ م°، وينبغى كذلك أن يتمتع باستقرار فى بنيته وألا يتجدد أو يتقوض بمضى الوقت، ولا بد ألا يجتذب الرطوبة وأن يكون مضاداً للحرائق.

ومواد العزل الحرارى يجب أن تخلو من الكبريت والمواد الرابطة التى قد تتفث غازاً، أو تتبخر بين درجتى ٣٠، ٢٠٠ م° كما ينبغى أن تكون خفيفة الوزن.

### الهيكل الخارجى للمجمع:

يزود المجمع بهيكل خارجى يقى العازل وصفيحة الامتصاص من الجو الخارجى ويقلل من الفاقد الحرارى إلى الحد الأدنى، وتستعمل لتصنيع هذا الهيكل مادة كالألومنيوم أو الصلب المجلفن أو الزجاج الليفى وما شابه، ومن الموصى به أن تستعمل ذات المواد لتصنيع القاعدة المقام عليها المجمع وهيكله الخارجى لتفادى التآكل الكيمايى بينهما، وإن كانت مثل هذه المشاكل لا تظهر بتصنيع الهيكل من الزجاج الليفى أو البلاستيك.

وينبغى أن يقاوم هذا الصندوق الخارجى التأثيرات المناخية، وكذلك إجهادات الأحمال المركبة عليه أو عمليات النقل والتداول.

ولا بد أن يصمم كساء المجمع بأسلوب يمنع تراكم الماء المتكثف بكيفية قد تفسد قدراته الوظيفية، وينبغى أن يكفل تصميمه عدم تولد إجهادات مفرطة فى الغطاء أو الواجهة المزججة حتى مع أقصى درجات الحرارة ارتفاعاً. ووسائل منع التسرب والأجزاء الأخرى يجب أن تكون قادرة على تحمل تقلبات الطقس، وكذا تقلبات درجات الحرارة، أو ثباتها عند نفس القيمة لفترات طويلة.

## توجيه المجمع:

من الأهمية بمكان أن يسقط الإشعاع عموديًا على سطح الامتصاص من أجل تقليل الفاقد نتيجة الانعكاس.

على أية حال، فإن موضع الشمس لا يبقى ثابتًا، بل يتغير مع الوقت من اليوم ومن السنة، وزاوية سقوط الأشعة على سطح الأرض بذلك تتوقف على تلك العوامل مثل خط عرض المكان والوقت من اليوم والسنة، ومن أجل ذلك يحتفظ بالمجمعات الشمسية على الدوام في وضع مائل مواجه للشمس بحيث تتلقى الحد الأقصى من إشعاعها الشمسي وتحوله إلى حرارة، وزاوية الميل المثلى على السطح الأفقى تساوى زاوية خط عرض المكان مضافاً إليها ١٥ درجة خلال الشتاء أو مطروحاً منها ١٥ درجة خلال الصيف فى نصف الكرة الأرضية الشمالى، ولما كانت الشمس فى حركة دائمة بالسمااء فينبغى - للحصول على أقصى مردود من المجمع - أن يتبع حركتها على الدوام.

ويلزم مقدار هائل من الطاقة الكهربائية لى تتحقق هذه المتابعة، وهو أمر غير عملى ولا ينصح به، ومن ثم فيحتفظ بالمجمعات ذات الصفيحة المسطحة فى وضع ثابت موجهة نحو الجنوب للاستفادة من أقصى كمية من الطاقة فى أثناء النهار، ولا يصنع الانحراف عن اتجاه الجنوب بزاوية ١٥ درجة كبير فرق فى إجمالى المردود الحرارى طوال اليوم.

ويعتمد الميل عن السطح الأفقى على الغرض الذى يستعمل فيه الماء الساخن، فإذا كانت الحاجة إلى درجات حرارة عالية أكثر صيفاً، فيكون الميل



مساويًا لزاوية خط العرض مطروحًا منها ١٥ درجة، ولتحقيق أقصى استفادة في شهور الشتاء تساوي زاوية الميل زاوية خط العرض مضافًا إليها ١٥ درجة، أما لتحقيق أقصى استفادة على مدار العام، فتحتفظ بزاوية ميل مساوية لزاوية خط العرض في المكان.

### تصميمات المجمع:

كتفت البحوث والتطوير نشاطها خلال السنوات القليلة الماضية، مما أفرز العديد من التصميمات لمجمعات الطاقة الشمسية لمنظومات تسخين المياه، وتتنوع نظم المجمعات هذه بصفة أساسية في تصميم الجزء الممتص للطاقة، وفي شكل (٤ - ٤) بعض من هذه النظم وهي:

أ- الأنابيب المدموجة (المتضمنة).

ب- الأنابيب المركبة ناحية السطح غير المعرض.

ج- الأنابيب المركبة ناحية السطح المعرض.

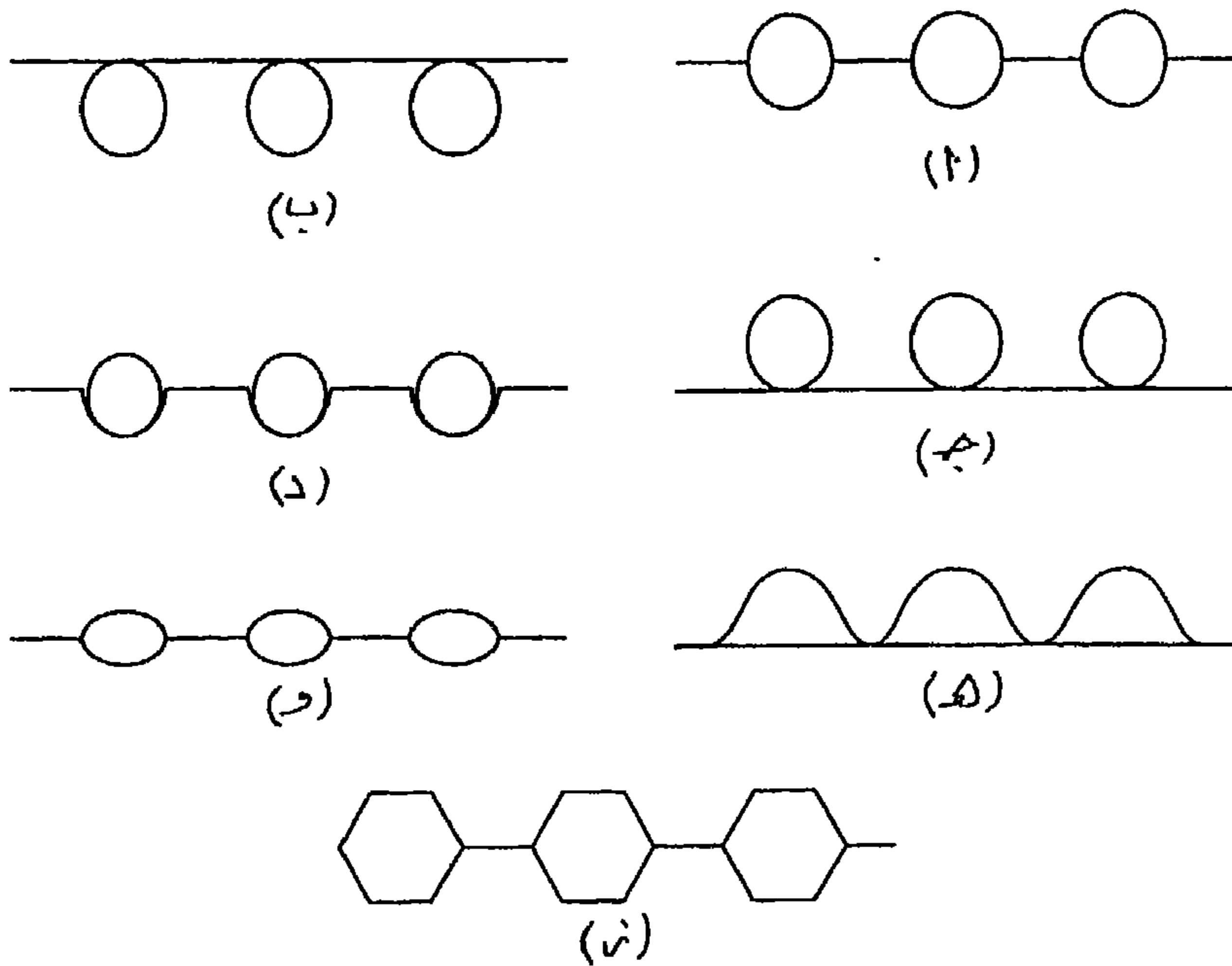
د- الأنابيب المركبة داخل أخاديد.

هـ- صفيحة متعرجة مثبتة على أخرى مسطحة مستوية.

و- صفيحتان متعرجتان من الناحيتين.

ز- أنابيب ذات مقطع سداسي.

ويبين شكل (٤ - ٤) رسمًا تخطيطيًا لكل من هذه التصميمات



شكل (٤ - ٤)  
التصميمات المختلفة لمجمع

- (أ) أنابيب مدمجة  
(ب) أنابيب مركبة ناحية السطح غير المعرض  
(ج) أنابيب مركبة ناحية السطح المعرض  
(د) أنابيب مركبة داخل أخاديد  
(هـ) صفيحة متعرجة  
(و) صفيحتان متعرجتان من الناحيتين  
(ز) أنابيب ذات مقطع سداسي

وقد اتبعت آليات متنوعة في تثبيت الأنابيب على صفيحة الامتصاص بعضها مبين بشكل (٤-٤)، ومما يلاحظ أن الحرارة ستتقل من صفيحة الامتصاص الساخنة إلى المائع الناقل للحرارة، والذي ينساب خلال الأنابيب أو المجارى، ولاستخلاص أكبر قدر من الحرارة من الممتص ينبغي أن يكون التماس بين الصفيحة

والأنابيب تمامًا بقدر الإمكان، والمجاري المدمجة هي أفضل ما يحقق ذلك، والأنابيب التي تلحم بصفحة الامتصاص تحقق هي الأخرى نفس القدر من الفاعلية بشرط جودة اللحام وعدم ترك ثغرة هوائية بين الصفحة وأسطح الأنابيب، وعلى أية حال فلا يتيسر اللحام بين معدنين مختلفين كالنحاس الأحمر والألومنيوم.

ويشيع الآن استخدام صفائح الامتصاص المصنعة من الألومنيوم والأنابيب المصنعة من النحاس الأحمر، ويتم ربطهما معاً بوسائل ميكانيكية، ومن هنا لا تكون مثل هذه المجمعات بالكفاءة المرجوة حيث لا يمكن تحقيق تلامس تام بين السطحين، وتثبت الأنابيب في مجار من الألومنيوم ثم يضمن معاً بتقنيات الحرارة العالية والضغط.

ولم تتوفر هذه المنظومات - حتى الآن - بالهند، وإن انتشر استخدامها في بلاد أخرى، ويتوقف انتقال الحرارة من وحدة الامتصاص على مدى القرب بين الأنابيب. فمن الناحية النظرية نحصل على أفضل أداء عندما تتلامس هذه الأنابيب، إلا أن مثل هذا الترتيب سيزيد من تكلفة المجمع، وعلى ذلك فهناك تصميم وسط أمثل يجمع ما بين حسن الأداء واعتدال التكاليف، وعادة ما يفصل بين الأنابيب بمسافة حوالى ١٠ سنتيمترات إذا كان قطرها حوالى ١,٢٠ سنتيمتر.

### التبادل الإشعاعي بين الأسطح:

لدراسة تبادل طاقة الإشعاع بين سطحين يفصل بينهما وسط لا يمتصها، لنأخذ في الاعتبار كيفية مواجهة السطحين لبعضهما وشكلهما الهندسى، بالإضافة إلى درجتى حرارتهما وخواص كل سطح، ويمكن ببساطة تحليل أثر الشكل الهندسى على تبادل طاقة الإشعاع بوضع تعريف لمعامل شكل السطحين Configuration Factor (م٢)، وهو يمثل الجزء من الإشعاع الذى يغادر السطح س١ والواصل للسطح س٢.

وعند اعتبار تبادل إشعاعي بين سطحين أسودين تكون كمية الإشعاع المغادرة للسطح س<sub>١</sub> والواصلة للسطح س<sub>٢</sub> = ط<sub>١</sub> س<sub>١</sub> م<sub>٢١</sub>، والإشعاع المغادر للسطح س<sub>٢</sub> ليصل السطح س<sub>١</sub> = ط<sub>٢</sub> س<sub>٢</sub> م<sub>١٢</sub>، حيث ط<sub>١</sub>، ط<sub>٢</sub> هما القدرة الانبعاثية للجسم الأسود لكل وحدة مساحات، س<sub>١</sub>، س<sub>٢</sub> هما مساحتا السطحين اللذين ينتقل الإشعاع بينهما.

ويعطى صافى طاقة الإشعاع المتبادلة بالمعادلة:

$$\text{ح } ٢١ = ط \text{ ب } ١ \text{ س } ١ \text{ م } ٢١ - ط \text{ ب } ٢ \text{ س } ٢ \text{ م } ١٢ \quad (١-٤)$$

فإذا كان للسطحين نفس درجة الحرارة فإن ط<sub>١</sub> = ط<sub>٢</sub>، ح<sub>٢١</sub> = ٠. ومن ثم نحصل على العلاقة التبادلية: س<sub>١</sub> م<sub>٢١</sub> = س<sub>٢</sub> م<sub>١٢</sub> (٢-٤)

والمعادلة (٢-٤) تعتمد اعتمادًا صرفًا على الشكل الهندسى فى الطبيعة، وهى صحيحة لكل الأسطح الانتشارية بصرف النظر عن درجة حرارتها، ومن ثم فإن صافى التبادل الإشعاعي بين سطحين أسودين تحدده العلاقة

$$\text{ح } ٢١ = س ١ \text{ م } ٢١ (ط \text{ ب } ١ - ط \text{ ب } ٢) = س ٢ \text{ م } ١٢ (ط \text{ ب } ١ - ط \text{ ب } ٢) \quad (٣-٤)$$

وحيث أن ط<sub>١</sub> = σ<sup>(\*)</sup> د<sup>(\*)</sup>، فيمكننا كتابة المعادلة (٣-٤) فى الصورة

$$\text{ح } ٢١ = س ١ \text{ م } ٢١ σ (د ١ - د ٢) = س ٢ \text{ م } ١٢ σ (د ١ - د ٢) \quad (٤-٤)$$

حيث د<sub>١</sub>، د<sub>٢</sub> هما درجتا حرارة السطحين س<sub>١</sub>، س<sub>٢</sub> على الترتيب، ولما كانت (ط<sub>١</sub> - ط<sub>٢</sub>) هى فرق مستوى الطاقة المؤدى إلى انتقال الحرارة، فالمقدار  $\frac{س ١ \text{ م } ٢١}{س ٢ \text{ م } ١٢}$  يمثل (المقاومة) التى يتسبب فيها الشكل الهندسى للسطحين للسريان، (إذا ما شبهنا الأمر بدائرة كهربائية). وعند تبادل الحرارة الإشعاعية بين سطحين غير أسودين، نأخذ فى الحسبان الانعكاسات

---

(\*) الرمز σ هنا يدل على ثابت ستيفان بولتز مان (المترجم)

المتعددة على السطحين، وسنقصر مناقشتنا على أبسط الحالات وهي الخاصة بـسطحين معتمين رماديين لهما معامل انبعاث ( $\epsilon$ ) = معامل الامتصاص ( $\alpha$ )، ومعامل انعكاسية ( $\rho$ ) =  $1 - \alpha = 1 - \epsilon$ ، ولمثل هذين السطحين يعطى معدل الطاقة الإشعاعية الكلية التي تغادر كل وحدة مساحة من سطح ما، وهي المسماة بالإشعاعية (ش) radiososity بالصيغة ش =  $\epsilon \cdot \rho + \epsilon \cdot \text{ط ب} + (1 - \epsilon) \cdot \text{خ}$

والطاقة الإشعاعية الصافية (المحصلة) التي تغادر السطح هي الفرق ما بين الإشعاعية (ش) التي تغادر السطح والإشعاع irradiation خ الساقط على السطح، أى أن

$$Q = (\text{ش} - \text{خ}) \cdot \text{س}$$

وبحذف الإشعاع خ من المعادلتين السابقتين نحصل على:

$$Q = \text{س} \left[ \text{ش} - \frac{\epsilon \cdot \text{ط ب}}{\epsilon - 1} \right] = \frac{\epsilon \cdot \text{س}}{\epsilon - 1} (\text{ش} - \text{ط ب}) \quad (4-4)$$

ويمكن اعتبار الطاقة الإشعاعية الصافية التي تغادر السطح الرمادى بمثابة التيار فى دائرة كهربية منازرة (شكل ٤-٥) عندما يسقط فرق جهد قدره ( $\text{ط ب} - \text{ش}$ ) عبر مقاومة كهربية مقدارها  $\left( \frac{\epsilon - 1}{\epsilon \cdot \text{س}} \right)$

وترجع هذه المقاومة إلى عدم اكتمال مثالية السطح كمصدر لانبعاث وامتصاص الإشعاع مقارنة بسطح أسود.

والآن، فنلدرس طاقة الإشعاع المتبادلة بين سطحين رماديين بمساحة س<sub>١</sub>، س<sub>٢</sub>: فالإشعاع الذى يغادر س<sub>١</sub> ويصل إلى س<sub>٢</sub> = ش<sub>١</sub> س<sub>١</sub> م<sub>٢١</sub>، والإشعاع الذى يغادر س<sub>٢</sub> إلى س<sub>١</sub> = ش<sub>٢</sub> س<sub>٢</sub> م<sub>١٢</sub>.

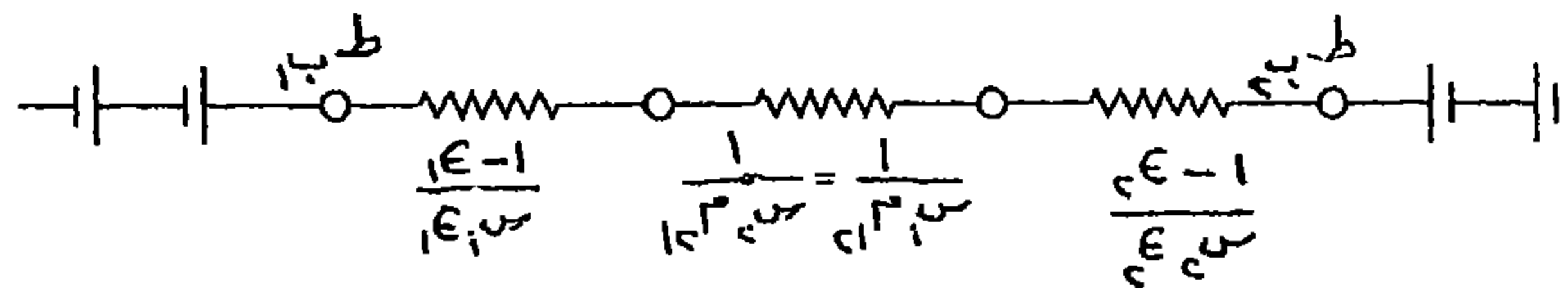
والإشعاع الصافى المتبادل بين السطحين =

$$\text{ص ٢١} = \text{ش ١ س ١ م ٢١} - \text{ش ٢ س ٢ م ١٢}$$

والآن باعتبار تبادلية العلاقات نحصل على  $v_1 = s_{1m} (v_1 - v_2) = s_{2m} (v_2 - v_1)$  (٥-٤)

وهكذا فعند تبادل طاقة الإشعاع بين سطحين رادييين تعود المقاومة  $\frac{1}{s_{1m}} = \frac{1}{s_{2m}}$  إلى الشكل الهندسى ووضع السطحين والمقدارين  $v_1$ ،  $v_2$

يمكننا الآن أن نكون دائرة كهربية مكافئة للسطحين الرادييين تضم (مقاومة) كل سطح  $\frac{1}{\epsilon - 1}$ ، وكذلك المقاومة الناتجة عن الشكل الهندسى  $\frac{1}{s_{1m}}$



شكل (٥-٤)

الدائرة الكهربائية المكافئة للتبادل الحرارى بين سطحين رادييين

ومعدل تبادل الإشعاع الصافى بين السطحين الرادييين  $v_1 =$

$$\text{حيث } v_1 = \frac{v_{1b} - v_{2b}}{\left[ \frac{\epsilon_1 - 1}{s_{1m} \epsilon_1} + \frac{1}{s_{1m}} + \frac{\epsilon_2 - 1}{s_{1m} \epsilon_2} \right]} = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\left[ \frac{\epsilon_1 - 1}{s_{1m} \epsilon_1} + \left( \frac{1}{s_{1m}} \right) + \frac{\epsilon_2 - 1}{s_{1m} \epsilon_2} \right]} \quad (٦-٤)$$

فى هذه المعادلة قسم فرق الجهد الإجمالى على مجموع المقاومات.

وهناك بعض السمات الخاصة بخصوص وضعية السطوح هندسياً تتلخص فيما يلي:

١ - لسطحين متوازيين ذوى امتداد لا نهائى:  $s_1 = s_2 = s$ ،  $m_1 = m_2 = 1$

ومن ثم فمن المعادلة (٦-٤) نحصل على  $v_1$

$$\frac{s \sigma (d_1^2 - d_2^2)}{1 - \left(\frac{1}{\epsilon_2}\right) + \left(\frac{1}{\epsilon_1}\right)} = v_1 \quad (٧-٤)$$

٢ - لأسطوانتين ذاتى محور مشترك  $m_1 = m_2 = 1$  وتكون

$$v_1 = \frac{s_1 \sigma (d_1^2 - d_2^2)}{\left[1 - \left(\frac{1}{\epsilon_2}\right)\right] \left(\frac{s_1}{s_2}\right) + \left(\frac{1}{\epsilon_1}\right)}$$

ولسطح محدب صغير مساحته  $s_1$  محاط إحاطة كاملة بسطح مقعر مساحته  $s_2$  حيث  $s_1 \gg s_2$ ،  $m_1 = m_2 = 1$ ، تأخذ المعادلة (٦-٤) الصورة:  $v_1 = s_1 \epsilon_1 \sigma (d_1^2 - d_2^2)$  (٩-٤)

ويمكن تطبيق ذات المعادلة فى حالة مجمع للطاقة الشمسية ذى صفيحة مستوية يشع الطاقة للوسط المحيط به.

وفى سبيل تحويل معادلة انتقال الحرارة إلى معادلة خطية بدلالة الفروق فى درجات الحرارة مرفوعة إلى الأس الأول سنستخدم التحليل الرياضى:

$$(d_1^2 - d_2^2) = (d_2^2 - d_1^2) (d_2^2 + d_1^2) \cdot$$

$$= (d_2 - d_1) (d_2 + d_1) (d_2^2 + d_1^2)$$

ومن ثم تأخذ المعادلة (٦-٤) الصورة:  $Q_1 = s_1 h - s (d_2 - d_1)$  (١٠-٤)

حيث  $h - s$  هى معامل انتقال الحرارة بالإشعاع ويعطى بالمقدار

$$\text{هـ ش} = \frac{\sigma (d_1 + d_2) (d_1^2 + d_2^2)}{\left(\frac{\epsilon_1 - 1}{\epsilon_1}\right) \frac{1}{r_{1m}} + \frac{1}{r_{2s}} + \frac{\epsilon_2 - 1}{\epsilon_2}} \quad (4-11)$$

ويمكن التعبير عن هـ ش في الحالات الخاصة المشار إليها سابقاً كما يلي:

١- في حالة سطحين متوازيين:  $r_{1m} = r_{2s} = 1$

$$\text{هـ ش} = \frac{\sigma (d_1 + d_2) (d_1^2 + d_2^2)}{1 - \left(\frac{1}{\epsilon_1}\right) + \left(\frac{1}{\epsilon_2}\right)} \quad (4-12)$$

٢- في حالة أسطوانتين طويلتين لهما محور مشترك:  $r_{1m} = 1$

$$\text{هـ ش} = \frac{\sigma (d_1 + d_2) (d_1^2 + d_2^2)}{\left[1 - \left(\frac{1}{\epsilon_1}\right)\right] \left(\frac{1}{r_{2s}}\right) + \left(\frac{1}{\epsilon_2}\right)} \quad (4-13)$$

٣- مع سطح محدب صغير محوط بأكمله داخل سطح مقعر كبير (س، س)  $(r_{1m} = 1)$

$$\text{هـ ش} = \epsilon_1 \sigma (d_1 + d_2) (d_1^2 + d_2^2)$$

وإذا ما فقد سطح ما أو اكتسب حرارة عن طريق تيارات الحمل والإشعاع في ذات الوقت، فيعرف معامل انتقال الحرارة المشترك بـ هـ ح ش = هـ ح + هـ ش حيث هـ ح هي معامل انتقال الحرارة بتيارات الحمل.

مثال (١): سطح زجاجي مساحته  $2 \times 3$  متر لمجمع ذي صفيحة مستوية في درجة حرارة  $75^\circ \text{م}$ ، معامل انبعاثه  $0.9$ ، يفقد الحرارة بالحمل والإشعاع إلى الوسط المحيط به (في درجة صفر م)، ومعامل انتقال الحرارة بالحمل  $4$  وات /  $\text{م}^2$ ، ك، احسب معدل فقدان الحرارة حيث  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ (*)}$ .

(\*) هكذا في الأصل ولا بد من إضافة وحدات المعامل  $\sigma$  هنا وهي وات /  $\text{م}^2$ . ٥ ك ٤



الحل: سنرمز للغطاء الزجاجي والوسط المحيط بالرقمين ١، ٢ على الترتيب، يمكن كتابة هـ ش في الصورة هـ ش =  $\sigma \in (d_1 + d_2) (d_1^2 + d_2^2)$

$$= (0,9) (273 + 348) (273^2 + 348^2) =$$

$$= 6,20 \text{ وات} / \text{م}^2 \text{ كلفن}$$

وبذلك فإن هـ ح ش = هـ ح + هـ ش =  $6,2 + 4,0 = 10,2$  وات / م<sup>2</sup> كلفن

$$\text{ص } 21 = \text{س } 1 \text{ هـ ح ش } (d_1 - d_2)$$

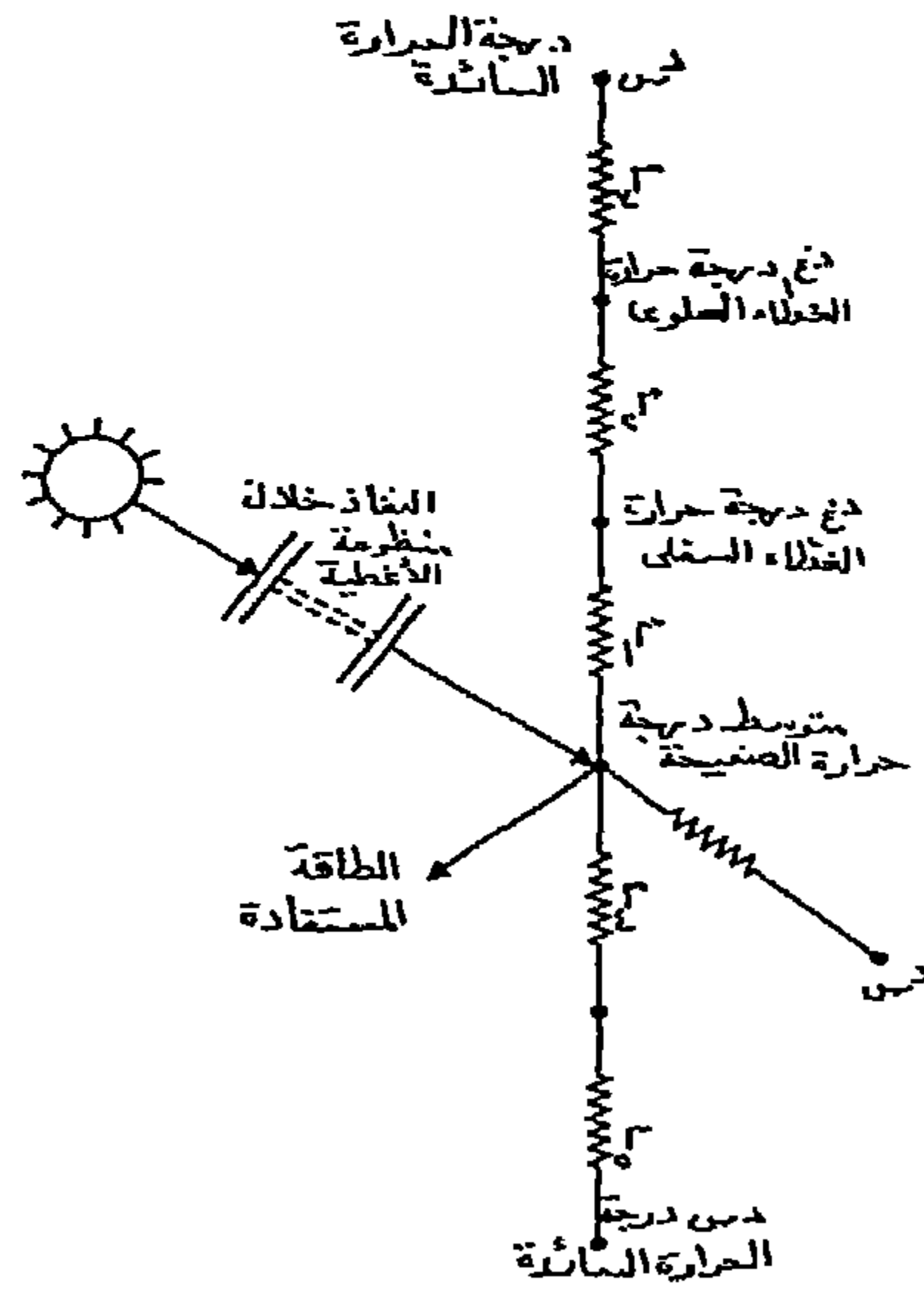
$$= (273 - 348) (10,2) (3 \times 2) =$$

$$= 4590 \text{ وات}$$

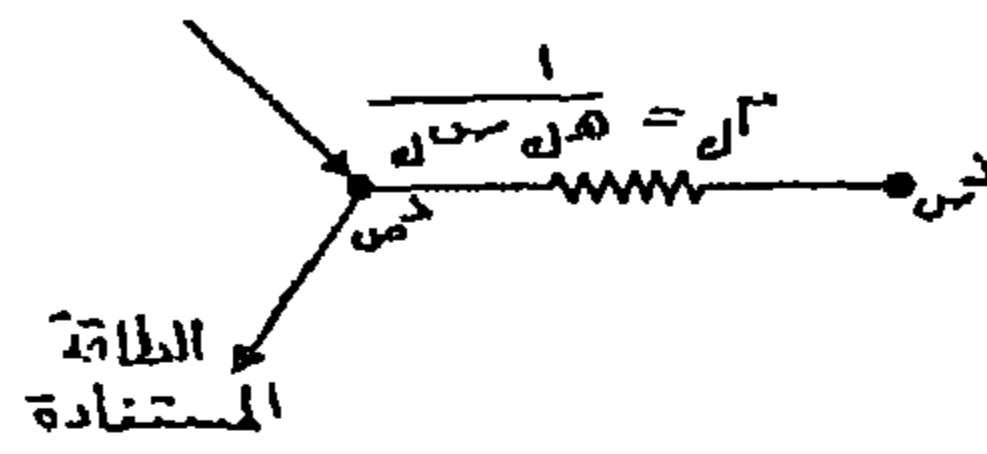
### الفواقد من مجمع الطاقة:

عندما تسقط الطاقة الشمسية على سطح ممتص لمجمع، تنتقل معظم هذه الطاقة إلى الوسط الناقل الذي يحملها بعيدًا في صورة مفيدة من الطاقة، على أية حال، فإن بعضًا من الطاقة يفقد إلى الوسط المحيط بأساليب مختلفة، وفيما يلي تحليل لهذه الفواقد التي تؤثر في أداء مجمع الطاقة.

يوضح شكل (٤ - ٦) (الشبكة الحرارية) لغطاء مزدوج لمجمع شمسي مسطح، وستمثل فواقد الطاقة في صورة (مقاومات حرارية) وبغرض تبسيط تحليلنا سنضع الافتراضات التالية:



(أ)



(ب)

شكل (٤ - ٦)

الشبكة الحرارية لمجمع شمسي مسطح ذي غطاء مزدوج

أ - المقاومات التفصيلية

ب - الشبكة المبسطة المناظرة

- (١) الإشعاع الشمسى الساقط على المجمع منتظم ومستمر .
- (٢) المجمع يعمل تحت ظروف ثابتة ومستقرة.
- (٣) درجات حرارة الصفيحة الممتصة والغطاء المزدوج الشفاف منتظمة.
- (٤) الفاقد من الطاقة فى الاتجاه إلى أعلى خلال الغطاء الشفاف أحادى البعد  
one dimensional.
- (٥) الفاقد من الحرارة فى الاتجاه إلى أسفل خلال العازل السفلى أحادى البعد.
- (٦) الفاقد من الحرارة فى الاتجاه العرضى عبر حافة العازل له بعد واحد  
حول محيط المجمع.
- (٧) تسود نفس درجة حرارة الوسط المحيط حول المجمع فى جميع  
الاتجاهات.

لحساب الاتزان الحرارى لمجمع طاقة شمسية، يوضح شكل (٤ - ٦ أ) المقاومات الحرارية المختلفة التفصيلية على حين يبين شكل (٤ - ٦ ب) هذه المقاومات بعد توحيدها فى مقاومة واحدة، بحيث يمكننا التعبير عن الفواقد من الطاقة فى الصورة المبسطة:

$$ح ف = \frac{د ص - د س}{م ك} = هـ ك - س ك (د ص - د س) \quad (٤-١٥)$$

حيث هـ ك معامل فقد الحرارة الكلى المعتمد على مساحة المجمع الكلية س ك

الفاقد من الحرارة خلال الغطاءين الشفافين:

فى حالة الاستقرار الحرارى، تتساوى الحرارة المنتقلة من الصفيحة الممتصة إلى الغطاء السفلى مع الحرارة المنتقلة من الغطاء السفلى إلى الغطاء العلوى، وتتساوى كذلك مع الطاقة المفقودة إلى الوسط المحيط من الغطاء العلوى.

والحرارة المنتقلة من الصفيحة الممتصة في درجة د ص إلى الغطاء السفلى وهو في درجة د غ<sub>٢</sub> تنتقل بتيارات الحمل والإشعاع بالموجات تحت الحمراء، وهي تعطى بالمعادلة:

الحرارة المفقودة من الغطاء العلوى = الحرارة المنتقلة من الصفيحة الممتصة إلى الغطاء السفلى

$$(١٦-٤) \quad \frac{س م \delta (د ص - د غ_٢)}{1 - \left(\frac{1}{\epsilon_{د غ_٢}}\right) + \left(\frac{1}{\epsilon_{ص}}\right)} + (د ص - د غ_٢) = س م هـ - ص - د غ_٢$$

حيث: س م = مساحة سطح المجمع.

هـ ص - د غ<sub>٢</sub> = معامل انتقال الحرارة بالحمل بين صفيحة الامتصاص والغطاء الزجاجى السفلى.

$\epsilon_{ص} =$  الانبعاثية تحت الحمراء لصفيحة الامتصاص.

$\epsilon_{د غ_٢} =$  الانبعاثية تحت الحمراء للغطاء السفلى

والحد الذى يعبر عن الإشعاع فى المعادلة (١٦ - ٤) يمكن تحويله لمقدار خطى بوضع التعريف التالى لمعامل انتقال الحرارة بالإشعاع بين صفيحة الامتصاص والغطاء الزجاجى السفلى:

$$(١٧-٤) \quad \frac{\delta (د ص + د غ_٢) (د ص + د غ_٢)}{1 - \left(\frac{1}{\epsilon_{د غ_٢}}\right) + \left(\frac{1}{\epsilon_{ص}}\right)} = هـ ش (ص - د غ_٢)$$

ومن ثم تتحول المعادلة (١٦ - ٤) إلى:

$$ح ن إلى أعلى = س م (هـ ص - د غ_٢) + هـ ش (ص - د غ_٢) (د ص - د غ_٢)$$

$$(١٨-٤) \quad \frac{(د ص + د غ_٢)}{١ م} =$$

$$(١٩-٤) \quad \frac{١}{س م (هـ ص - د غ_٢) + هـ ش (ص - د غ_٢) (د ص - د غ_٢)} =$$

وبذات الأسلوب يعطى الفاقد الحرارى من الغطاء السفلى فى درجة د غ<sub>٢</sub> إلى الغطاء العلوى فى درجة د غ<sub>١</sub> بالمعادلة

$$\text{ح ف ع} = \text{س م} (\text{هـ} - \text{غ}_2 - \text{غ}_1) + \text{ش} (\text{غ}_2 - \text{غ}_1) (\text{د غ}_2 - \text{د غ}_1) \\ \text{حيث } \frac{\text{د غ}_2 - \text{د غ}_1}{\text{س م}} = \frac{1}{\text{س م} (\text{هـ} - \text{غ}_2 - \text{غ}_1) + \text{ش} (\text{غ}_2 - \text{غ}_1)} \quad (20-4)$$

حيث هـ ش، غ<sub>٢</sub> غ<sub>١</sub> = معامل انتقال الحرارة بالإشعاع بين الغطاءين.

هـ غ<sub>١</sub> غ<sub>٢</sub> = معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الغطاءين.

$$\text{هـ ش، غ}_2 \text{ غ}_1 = \frac{6 (\text{د غ}_2 + \text{د غ}_1) - (\text{د غ}_2^2 + \text{د غ}_1^2)}{1 - \left(\frac{1}{\text{ع غ}_1}\right) + \left(\frac{1}{\text{ع غ}_2}\right)} \quad (21-4)$$

حيث ع غ<sub>١</sub>، ع غ<sub>٢</sub> = معامل الانبعاثية (للموجات تحت الحمراء) للغطاءين من السفلى والعلوى على الترتيب وتفقد الحرارة من الغطاء العلوى الشفاف بتيارات الحمل إلى الهواء المحيط وهو فى درجة حرارة د س، وبالتبادل الإشعاعى مع السماء وهى فى درجة د م، وللتسهيل تدمج الحرارة المنتقلة بالحمل والإشعاع إلى الهواء المحيط، ويمكننا كتابة

$$\text{ح ف ع} = \text{س م} (\text{هـ} - \text{غ}_1 - \text{غ}_2) + \text{ش، غ}_1 \text{ غ}_2 (\text{د غ}_1 - \text{د غ}_2) \\ \frac{\text{د غ}_1 - \text{د غ}_2}{\text{س م}} = \frac{1}{\text{س م} (\text{هـ} - \text{غ}_1 - \text{غ}_2) + \text{ش، غ}_1 \text{ غ}_2 (\text{د غ}_1 - \text{د غ}_2)} \quad (22-4)$$

حيث هـ غ<sub>١</sub> = معامل انتقال الحرارة بالحمل من الغطاء العلوى الشفاف إلى الهواء المحيط

هـ ش، غ<sub>١</sub> = معامل انتقال الحرارة بالإشعاع بين الغطاء العلوى والسماء

$$\text{هـ ش، غ}_1 \text{ غ}_2 = \frac{6 (\text{د غ}_1 + \text{د غ}_2) (\text{د غ}_1 - \text{د غ}_2)}{\text{د غ}_1 - \text{د غ}_2} \quad (23-4)$$

حيث  $E_1$  = معامل الانبعاثية (للموجات تحت الحمراء لسطح الغطاء العلوى)

$$\frac{1}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_3}} = R_1$$

(٢٤-٤)

المقاومات (الحرارية)  $R_1, R_2, R_3$  موصلة على التوالي وتعطى محصلتها بالصيغة

$$\frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = R_{eq}$$

(٢٥-٤)

وبذلك فإن  $Q = \frac{A(T_1 - T_2)}{R_{eq}}$   $Q$  = معدل انتقال الحرارة  $A$  = مساحة السطح  $T_1, T_2$  = درجات الحرارة

(٢٦-٤)

### فقد الطاقة من سطح المجمع الأسفل:

تفقد هذه الطاقة عبر العازل السفلى، ثم تفقد بالحمل، وإشعاع الموجات تحت الحمراء إلى الوسط المحيط، وتعطى المقاومة الحرارية للسطح السفلى بالمعادلة

$$\frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_3}} = R_2$$

(٢٧-٤)

حيث أهملت هنا الطاقة المفقودة بالإشعاع، حيث إن السطح السفلى يكون في درجة حرارة منخفضة وبالتالي يقل الفقد بالإشعاع، وحيث:

$L$  = سمك الطبقة العازلة.

$k$  = معامل التوصيل الحرارى للمادة العازلة.

$h_1$  = معامل انتقال الحرارة بالحمل من سطح المجمع السفلى إلى الوسط المحيط

ويمكننا التعبير عن فاقد الطاقة عبر السطح السفلي بالمعادلة

$$(28-4) \quad \text{ح د ق} = \frac{\text{د ص} - \text{ا د}}{\text{م ق}} = \text{هـ ق س ك} (\text{د ق} - \text{ا د})$$

### الفاقد في الحرارة خلال الحواف:

يمكن تقدير الحرارة المفقودة خلال الحواف من المعادلة:

$$(29-4) \quad \text{ح د ف} = \frac{\text{د ص} - \text{ا د}}{\text{م د}} = \text{هـ ف س ف} (\text{د ص} - \text{ا د})$$

حيث س ف = مساحة المحيط الخارجى للمجمع.

$$\text{هـ ف} = 0,5 \text{ وات / م}^2 \cdot \text{ك}$$

ويمكن كتابة المعادلة (29-4) بدلالة مساحة سطح المجمع الكلية.

$$\text{هـ ف} \cdot \text{س ك} = \text{هـ ف} \cdot \text{س ف}$$

$$(30-4) \quad \text{ح د ف} = \frac{\text{د ص} - \text{ا د}}{\text{م ف}} = \text{هـ ف س ك} (\text{د ص} - \text{ا د})$$

وحيث إن المقاومات الحرارية الثلاث م ع، م ق، م ف تعتبر على التوازي

فإن:

$$(31-4) \quad \text{م ك للمجمع} = \left( \frac{1}{\text{م ف}} + \frac{1}{\text{م ق}} + \frac{1}{\text{م ع}} \right)^{-1}$$

$$(32-4) \quad \text{هـ ك للمجمع} = \text{هـ ع} + \text{هـ ق} + \text{هـ ف}$$

حيث م ك = المقاومة الكلية لفقدان الحرارة من المجمع.

هـ ك = معامل الفقد الكلى للحرارة على أساس مساحة سطح المجمع الكلية

هذه هي العوامل المطلوبة في المعادلة (10-4)، والمعادلات السابقة تعطي

الحسابات لمعاملات فقد الحرارة في حالة وجود منظومة ذات غطاءين، ويمكن

تعديلها في حالة وجود غطاء مفرد أو عدة أغطية، وفي حل هذه المعادلات يلزم اللجوء إلى التجربة والخطأ، وحساب معامل فقدان الحرارة الكلى من السطح العلوى هـ ع مجهود ويستغرق الكثير من الوقت، ومن ثم فإن التقدير المباشر لقيمة هـ ع في حيز الإمكان بتطبيق المعادلة التجريبية الآتية، وهى ذات دقة كافية فيما يتعلق بأغراض التصميم:

$$\text{هـ ع} = \left[ \frac{\frac{1}{0.33} + \frac{N}{\left( \frac{D_i - D_v}{N + B} \right)}}{6^{D_v} (D_i + D_v) (D_i^2 + D_v^2)} \right] + \frac{[E_v + 0.05 N (E - 1)] \left[ \frac{1 - B + N^2}{E} \right]^{-1} - N}{(33-4)}$$

حيث:

$$A = 250 [1 - 0.044 (Y - 90)]$$

$$B = (1 - 0.04 - R + 0.0005 H - R^2) (1 + 0.091 N)$$

N = عدد الأغطية الزجاجية.

D = درجة الحرارة السائدة. ك.

E = معامل انبعاثية الزجاج.

$$6 = \text{ثابت ستيفان بولتزمان} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ وات / م}^2 \cdot \text{ك}^4$$

H = معامل انتقال الحرارة الخاص بالرياح: وات / م<sup>2</sup> · ك.

D<sub>v</sub> = متوسط درجة حرارة صفيحة امتصاص المجمع ك.

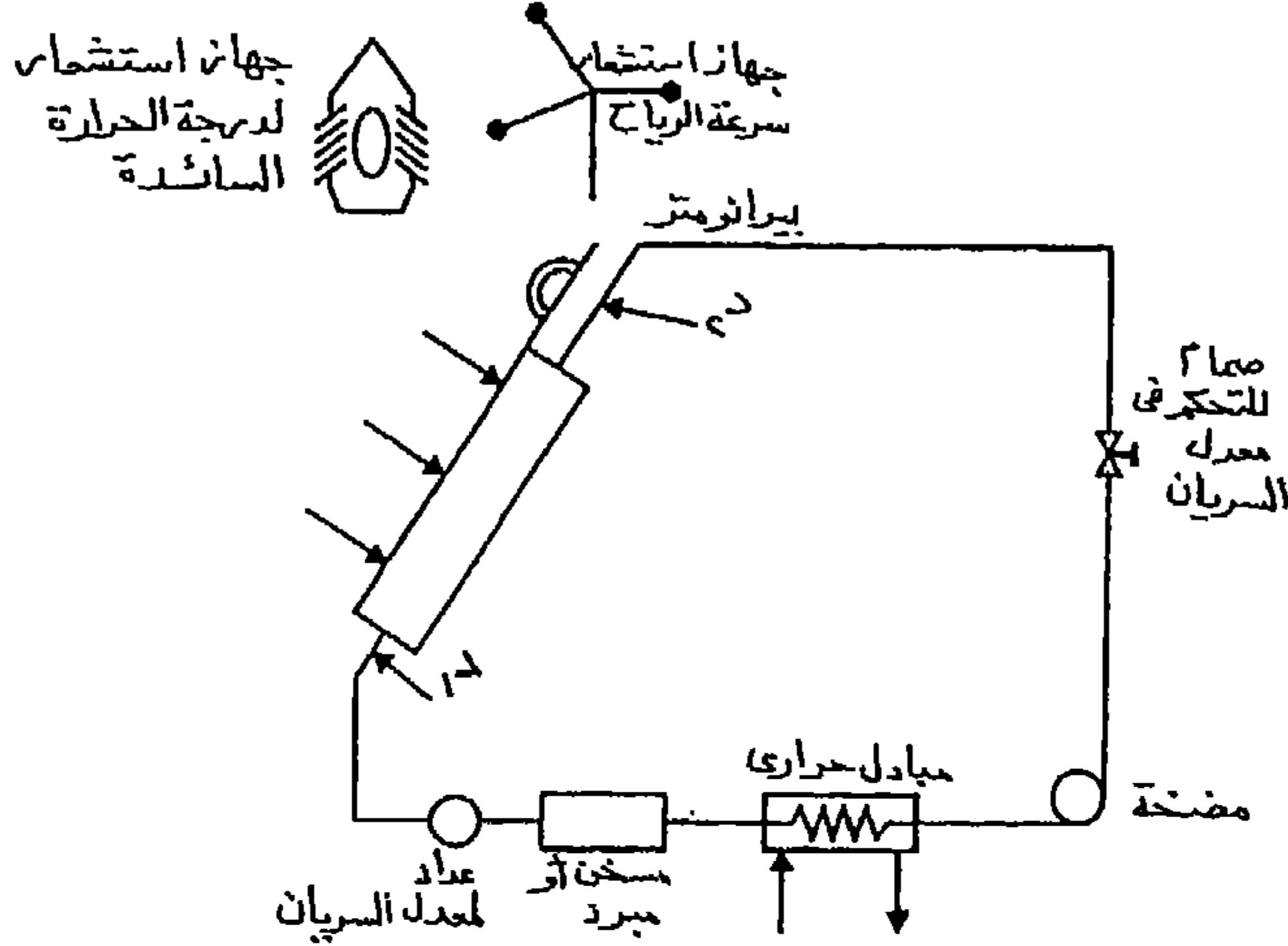
E<sub>v</sub> = معامل انبعاثية صفيحة الامتصاص.

Y = زاوية ميل سطح المجمع.



## اختبار أداء المجمع:

وضعت الجمعية الأمريكية لمهندسي التدفئة والتبريد وتكييف الهواء ASHRAE خطوات عمل لاختبار أداء يطبق على مجمعات التدفئة بالسوائل أو بالهواء، ويبين الشكل (٤ - ٧) رسمًا تخطيطيًا لأسلوب الاختبار، إذ يستعمل بيرانومتر في قياس الإشعاع الشمسي على سطح المجمع، وتحتوى الدائرة التى يسرى خلالها المائع على صمام للتحكم فى مقدار تدفق المائع، ومضخة لدفعه، ومبادل حرارى لامتصاص الحرارة المستفادة من الدائرة، ومعدة تسخين أو تبريد للتحكم فى درجة حرارة الدخول للمجمع، وجهاز لقياس مقدار معدل تدفق المائع، كما توجد وسائل استشعار لقياس درجات الحرارة عند مدخل المجمع ومخرجه، كما نحتاج لأجهزة قياس الضغط ومقدار الانخفاض فى الضغط عبر المجمع، وهناك كذلك وسائل لاستشعار الظروف السائدة من درجة حرارة وسرعة رياح.



شكل (٤ - ٧)

دائرة اختبار أداء المجمع

ويتعين أن يجرى الاختبار تحت ظروف مستقرة، من حيث ثبات الطاقة الإشعاعية المسلطة على سطح المجمع، وثبات سريان المائع عند درجة حرارة ثابتة عند مدخل المجمع، وكذلك يتعين أن تكون سرعة الرياح ودرجة الحرارة السائدة ودرجة حرارة خروج المائع كلها ثابتة، بما يتيح ثباتاً في مردود الطاقة المكتسبة.

والطاقة المفيدة المكتسبة تعطى بالمعادلة

$$\text{ص} = \dot{K} \dot{N} \quad (١د - ٢د) \quad (٤ - ٣٤)$$

حيث  $\dot{K}$  = معدل سريان المائع الحامل للحرارة.

$\dot{N}$  = الحرارة النوعية للمائع الحامل للحرارة

$\dot{د} ٢$  = درجة حرارة المائع لدى المخرج

$\dot{د} ١$  = درجة حرارة المائع لدى المدخل

وتعطى الكفاءة اللحظية للمجمع بالمعادلة

$$\eta = \frac{Q / \text{س م}}{\text{هـ ج}} = \frac{(\dot{K} / \text{س م}) \dot{N} \text{ض} (١د - ٢د)}{\text{هـ ج}} \quad (٣٥ - ٤)$$

حيث  $\text{س م}$  = مساحة سطح المجمع،  $\text{هـ ج}$  الإشعاع الإجمالي الساقط (الحزمى والانتشارى).

وعادة ما تجرى اختبارات أداء المجمع فى أيام مشرقة ذات معدل إشعاع عال. ومع تثبيت المجمع فى وضع متعامد تقريباً مع أشعة الشمس نعرف أن أغلب الطاقة المتلقاة هى طاقة حزمية عمودية، ونتيجة لذلك فإن حاصل ضرب معاملى النفاذية والامتصاص عند اختبار المجمع يجب أن يناظرا الإشعاع الحزمى عند سقوطه عمودياً، فإذا عبرنا عن حاصل ضرب معاملى النفاذية (ج) والامتصاص

(أ) عند السقوط العمودي بالحد (ج أ) ع فيمكننا التعبير عن الطاقة المستفادة بالمعادلة

$$ح ن = س م م [ هـ ج (ج أ) ع - ف (د ١ - د ٢) ] \quad (٣٦ - ٤)$$

حيث ف = معامل فقدان الطاقة الكلى، م = معامل نزح الحرارة من المجمع.

والمعامل م هو نسبة معدل سريان الحرارة الفعلى إلى المائع الحامل، إلى معدل سريان الحرارة بافتراض أن مجمل صفيحة الامتصاص تعمل عند درجة حرارة تساوى درجة حرارة المائع لدى دخوله.

$$م = \frac{ك. ن ض (د ٢ - د ١)}{س م [ هـ ١ - ف (د ١ - د ٢) ]} \quad (٣٧ - ٤)$$

حيث هـ ١ هي الطاقة الحرارية التى يمتصها المجمع.

وبقسمة طرفى المعادلة (٣٦ - ٤) على س م هـ ج نحصل على هذه الصيغة المعبرة عن الكفاءة.

$$\eta = \frac{ح ف}{س م هـ ج} = م (ج أ) ع - م ف \frac{د ١ - د ٢}{هـ ج} \quad (٣٨ - ٤).$$

فلمجمع معين يعمل تحت ظروف ثابتة لكل من الإشعاع الساقط والمائع حامل الحرارة تكون المعاملات م، (ج أ) ع، ف ثابتة تقريبًا، بصرف النظر عن ظروف الشمس ودرجة الحرارة، وإذا وقعنا رسمًا بيانيًا للعلاقة ما بين كفاءة المجمع والمقدار  $\frac{د ١ - د ٢}{هـ ج}$  فإننا نحصل على خط مستقيم يعطى ميله قيمة سالبة للمقدار م (ف) عمودية، والجزء المقطوع من محوره الرأسى يعطى القيمة م. (ج أ) ع

## المجمعات بالتركيز:

في حالة تطبيقات الطاقة الشمسية ذات درجات الحرارة العالية (مثل توليد الطاقة الحرارية) ينبغي أن تركز الطاقة الشمسية بوسيلة ضوئية قبل تحويلها لحرارة، ومن ثم فإن زيادة التأثير الحراري لجهاز التركيز يمكن تحقيقها بأن ينعكس أن ينكسر الإشعاع الشمسي بواسطة مرآيا أو عدسات، ويركز الضوء المنعكس أو المنكسر في منطقة البؤرة، مما يزيد من فيض الطاقة الذي يتلقاه الحمل المستهدف.

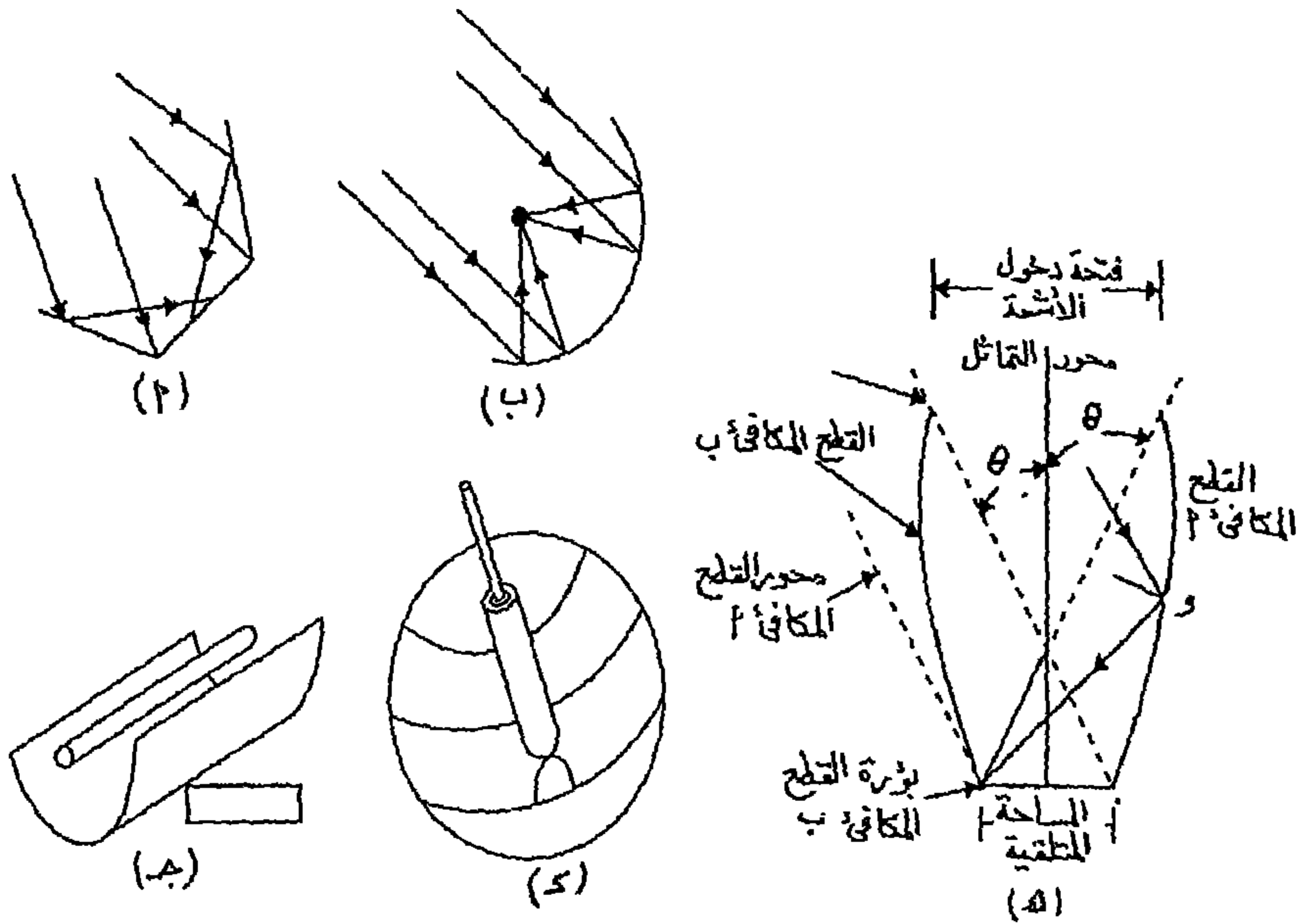
والنسبة ما بين المساحة التي تنفذ الأشعة خلالها ومساحة الجزء المتلقى تعرف بمعامل تركيز المساحة أو للتبسيط معامل التركيز (ك)، ويمكن التعبير عنه بالمعادلة.

$$K = \frac{S_a}{S_r}$$

حيث  $S_a$  هي مساحة المجمع المعرضة للإشعاع الشمسي،  $S_r$  هي المساحة المستهدفة التي تتلقاها.

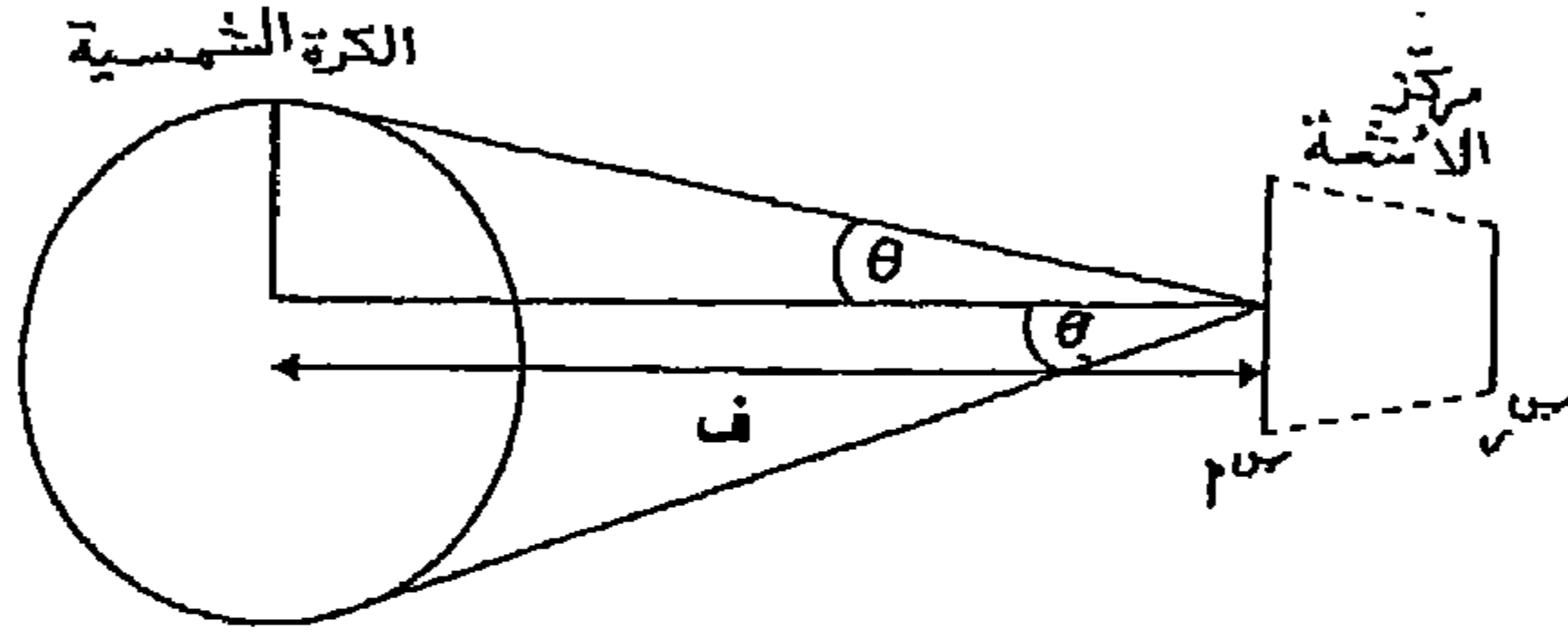
ويوضح شكل (٤-٨) بعض أنواع المركزات الدارجة، فالشكل (أ) يبين متلقيا (جهاز تلقى) مسطحًا ذا مرآيا مستوية تقوم بعكس الأشعة، ومعامل تركيز هذا النوع منخفض للغاية، ويوضح الشكل (ب) جهاز تركيز على شكل قطع مكافئ، والمركزات من هذا النوع تكون إما ذات بعد واحد (خطية) أو ذات بعدين مثل المركز الذي على شكل قطع مكافئ أسطوانى CPC (شكل جـ) أو ذات ثلاثة أبعاد (مركز على شكل قطع مكافئ مجسم (شكل د)، وتتمتع هذه المركزات بقيم عالية جدًا لمعامل التركيز، وشكل (هـ) به مركز ذو قطع مكافئ مجسم مركب،

وهو عبارة عن مركز خطي ذي بعدين يتكون من قطعتين مكافئتين منفصلين يميل سطحاهما بزاوية  $\theta \pm$  على محور المجمع الضوئي، وتعرف الزاوية  $\theta$  بزاوية التلقى للقطع المكافئ المجسم المركب، وتعرف زاوية التلقى بأنها الزاوية التي يمكن لمصدر ضوئي أن يتحرك خلالها مع استمرار تجمعه على عضو التلقى.



شكل (٤ - ١)

وبشكل (٤ - ٩) رسم تخطيطي لجهاز تركيز، حيث  $S$  هي المساحة المعرضة،  $R$  هي مساحة المتلقى وذلك لمركز دائري موضوع على مسافة  $F$  من مركز الشمس التي تمثل كرة إشعاعية نصف قطرها  $N$ ، والزاوية  $\theta$  هي نصف الزاوية التي تحصرها الشمس وهي نصف زاوية التلقى التي تناظر أقصى درجة تركيز.



شكل (٤ - ٩)

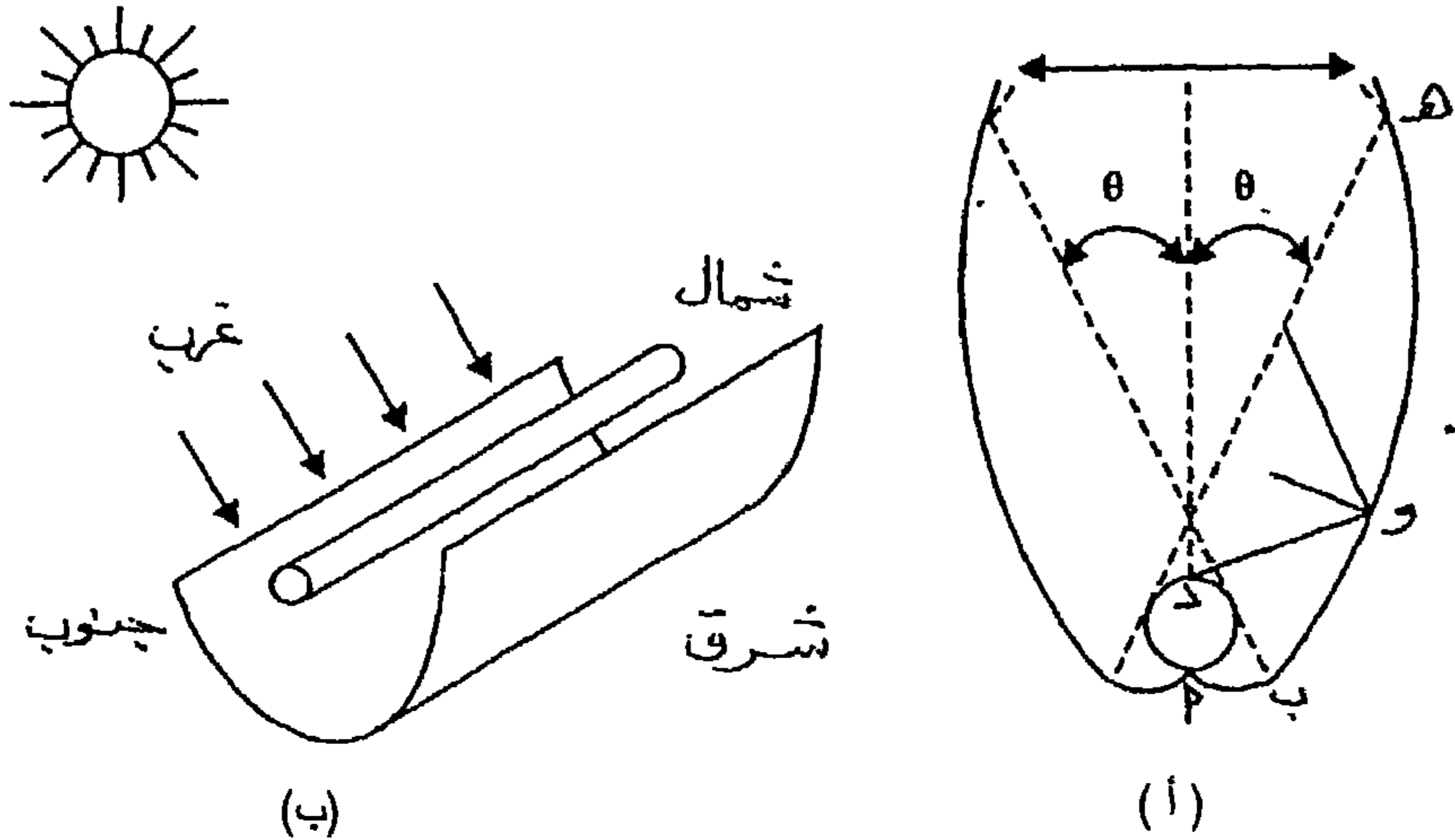
رسم تخطيطي لجهاز تركيز وعلاقته البعدية بالنسبة للشمس

ومعلوم أن نصف زاوية التلقى (\*)  $\theta = 16^\circ$  أو  $0.27^\circ$  وبالتالي فإن أقصى تركيز لجهاز نموذجي ذي ثلاثة أبعاد  $= 45000$ ، وأقصى تركيز لجهاز ثنائي الأبعاد  $= 0.212$  وللوصول إلى هذه المستويات من التركيز، لابد وأن يتعقب الجهاز الشمس في تحركها بشكل مستمر، والمركز الأسطوانى المركب الذى له شكل القطع المكافئ (شكل ٤ - ٨) جهاز عالى الكفاءة، وبترشيد تعقبه للشمس يمكن لمعامل تركيز هذا الجهاز أن يصل إلى  $\frac{1}{\theta}$  لنصف زاوية تلقى  $\theta$ ، وربما تنخفض فعالية الجهاز نتيجة عدم الانعكاس التام، علاوة على الخطأ فى رصد أو تعقب الشمس، وعند تشكيل الأسطح العاكسة، يلزم أن ينصف المستقيم العمودى على العاكس عند أية نقطة (و) عليه الزاوية بين الخط و ب، والشعاع الساقط على النقطة وبزاوية ميل  $\theta =$  على محور المجمع.

ويمكن للمتلقى ذى البعدين أن يتخذ العديد من الأشكال المتنوعة، فقد يتخذ شكلاً أنبوبياً (شكل ٤ - ١٠ أ) وفى هذا المركز المركب ذى القطع المكافئ يكون الجزء السفلى من العاكس (أ ب) دائرياً، فى حين يتخذ الجزء العلوى (ب هـ) شكل قطع مكافئ، وفى هذه الحالة يقتضى الأمر للجزء العلوى أن ينصف المستقيم العمودى على العاكس عند أية نقطة، والزاوية بين المماس و د الذى يماس المتلقى والشعاع الساقط عند و بزاوية مقدارها  $\theta$  بالنسبة لخط محور المجمع.

(\*) يرجى الرجوع إلى شكل (٣-٤) بالباب الثالث (المترجم)

ويمكن أن يوجه المركز الأسطوانى ثنائى الأبعاد بحيث ينطبق محوره الطولى مع اتجاه الشمال - الجنوب أو الشرق - الغرب، ويميل السطح المعرض نحو اتجاه خط الاستواء، ولدى توجيهه فى اتجاه الشمال - الجنوب (شكل ٤ - ١٠ ب) يتعين أن يتعقب المجمع الشمس بصفة مستمرة بإدارته حول محوره بحيث يواجه الشمس، ولا يلزم فى هذه الحالة تعديل الميل طبقاً للموسم (الوقت فى السنة) بالضرورة، حيث إن زاوية التلقى على امتداد محوره الطولى بالغة الكبر، وحين يوجه المركز بحيث ينطبق محوره الطولى على اتجاه الشرق - الغرب، ومع تعديل طفيف طبقاً للموسم لزاوية الميل، يصبح المركز قادراً على اقتناص أشعة الشمس بفعالية عبر زاوية التلقى الكبيرة على امتداد محوره الطولى، وبالمثل يمكن أن تكون المركزات الخطية ذات البعد الواحد والتي تستعمل فقط للدرجات المعتدلة من التركيز، مثبتة بصفة دائمة فى اتجاه الشرق - الغرب.



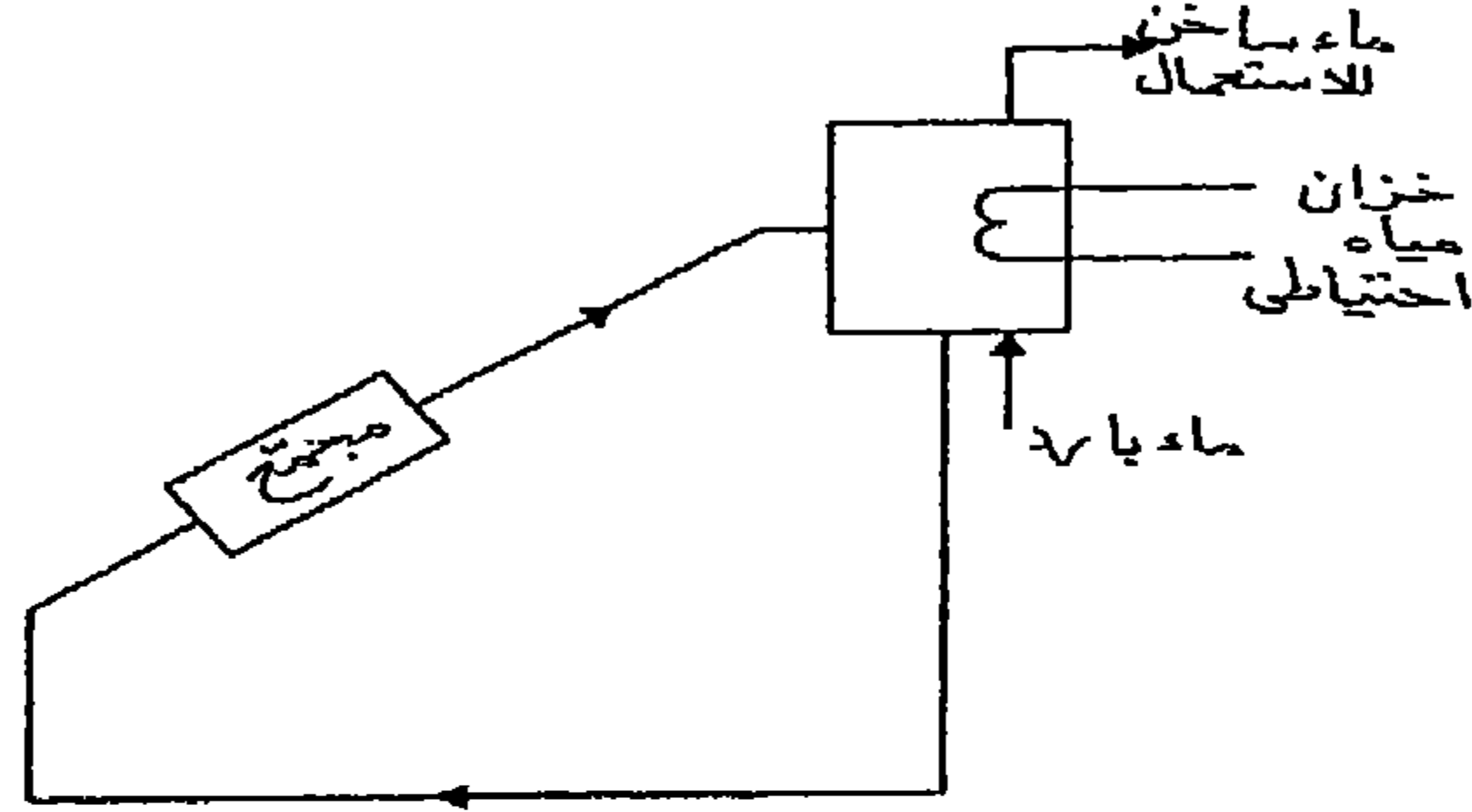
شكل (٤ - ١٠)

- (أ) مركز مركب بشكل قطع مكافئ ذو عضو امتصاص أنبوبى.  
 (ب) مركز أسطوانى بشكل قطع مكافئ موجه ناحية الشمال - الجنوب.

## مسخنات المياه الشمسية:

إن أكثر الاستعمالات جدوى وأكبرها من حيث التوسع المستقبلي للطاقة الشمسية توجد في مجال تسخين المياه، ولا تتطلب عملية التسخين هذه سوى درجة حرارة معقولة، ومن ثم فيمكن إنجازها بسهولة باستعمال مجمع قليل التكاليف من النوع ذي الصفائح المستوية.

وفي شكل (٤ - ١١ أ) مسخن مياه شمسي بسيط يعمل بتيارات الحمل الطبيعية، وتتكون منظومة هذا المسخن من مجمع ذي صفائح مستوية لتسخين المياه (عادة ما يكون ذا جدار مفرد مزجج)، وصهريج تخزين (بحيث يكون المجمع على منسوب منخفض عن منسوب صهريج التخزين)، ويعتمد سريان الماء في الدائرة بالكامل على فارق الكثافة ما بين المياه الساخنة داخل المجمع بفعل الشمس، والماء الأبرد عند قاع صهريج التخزين (نتيجة التدرج في درجات الحرارة)، وهذا النوع من مسخنات المياه الشمسية المعتمد على الانتقال الحراري السيفونى (\*) أصلح ما يكون للأجواء الحارة.



شكل (٤ - ١١ أ)

مسخن مياه شمسي بتيارات الحمل الطبيعية

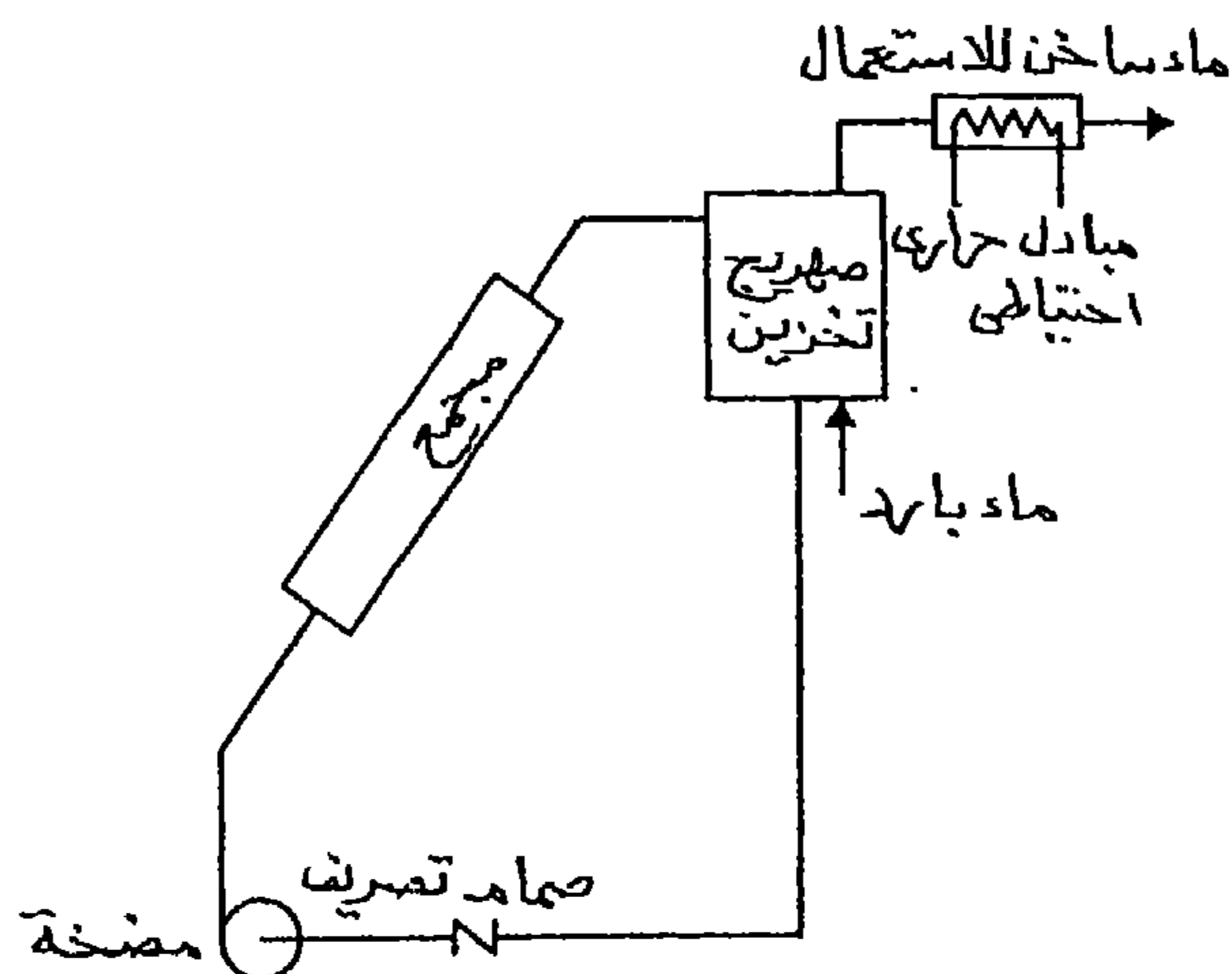
(\*) الانتقال الحراري السيفونى thermosiphon يعنى تبادلاً حرارياً يعتمد على تيارات الحمل في حركة المائع دونما حاجة إلى قوة رفع ميكانيكية (المترجم)



ولدى تغذّر وضع صهريج التخزين على منسوب أعلى من المجمع، تستعمل وسيلة لدفع الماء فى الدائرة (شكل ٤ - ١١ ب).

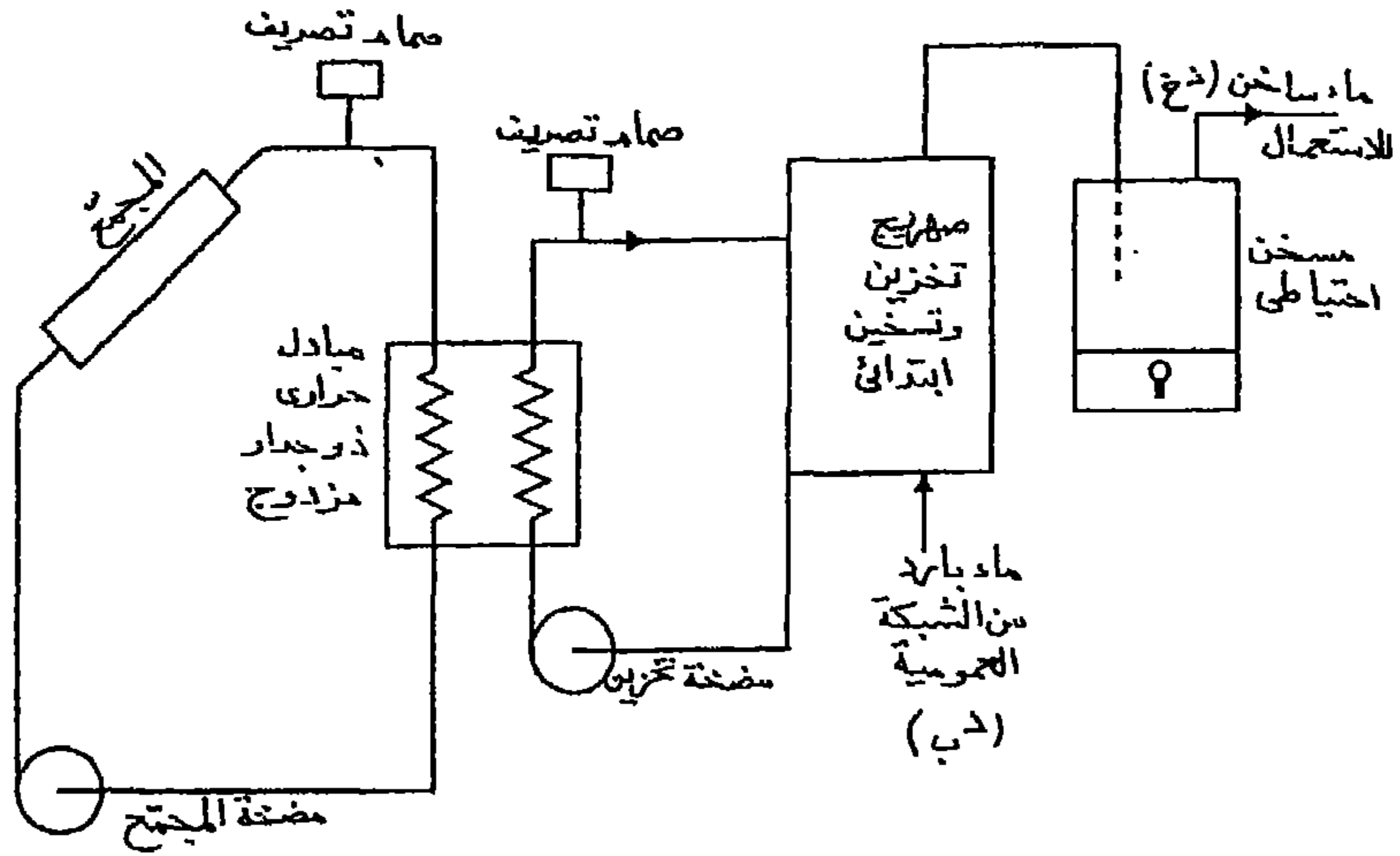
ويمكن مع هذا الترتيب وضع المجمع فوق سطح بناء ووضع صهريج التخزين فى الدور الأرضى، ويعمل محرك المضخة بموجب جهاز استشعار حرارى عندما يتخطى فرق درجات الحرارة ما بين مخرج الماء من المجمع وماء صهريج التخزين ست درجات مئوية، ولدى استعمال هذه المنظومة فى أجواء باردة لابد من توفير وسيلة لتصريف ماء المجمع.

وللحيلة دون غليان المياه فى المجمع عند تعرضه لشمس حامية مع ضعف سريان الماء فى دائرته، يلزم تركيب صمام تصريف أو تنفيث.



شكل (٤ - ١١ ب)

مسخن مياه شمسي بتيارات الحمل القسرية



شكل (٤ - ١١ جـ)

#### مسخن مياه شمسي بمحلول مضاد للتجمد

يبين شكل (٤ - ١١ جـ) مسخناً شمسياً للمياه بمحلول مقاوم للتجمد، وفي هذه المنظومة يستعمل محلول من جليكول الإيثيلين ethylene glycol في الماء في دائرة المجمع مع مبادل حرارى ذو حائط مزدوج، كوسيلة للحماية ضد التجمد، ولابد للمبادل الحرارى من جدار مزدوج من معدنين يحجزان بينهما المحلول المقاوم للتجمد ذا الأثر السام ويعزلانه عن مصدر المياه المستخدمة منزلياً، ويقتضى الأمر مضختين، إحداهما لدفع مائع دائرة المجمع (غير المضغوط) والأخرى لدفع مياه الاستخدام المنزلى (تحت ضغط). ولضمان إمداد وفير مؤكد من المياه، تلزم صورة من صور الطاقة المساعدة مثل الكهرباء أو الوقود الأحفوري، لدعم مصدر الطاقة الشمسى. ومن وجهة النظر الاقتصادية يوصى - عملياً - بأن تؤسس التصميمات على متوسط الإشعاع اليومي في أحد شهور الصيف، بحيث يستخدم إمداد الطوارئ هذا لمواجهة ظروف شح المياه الساخنة في الأيام الغائمة أو في الشتاء. ونستطيع حساب حمل تسخين المياه المنزلية الشهرى (ح) من الصيغة.

ح = ن و ن ع ح ف أن ص (د غ - د ب)

حيث ن و = عدد الأيام في الشهر

ن ع = عدد الأفراد ساكني المنزل.

ح ب = حجم المياه الساخنة اللازمة للفرد الواحد.

أ = كثافة الماء (١ كجم / لتر)

ن ص = الحرارة النوعية للماء (= ٤١٩٠ جول / كجم °م)

د غ = درجة حرارة الماء الساخن (حوالي ٦٠ °م)

د ب = درجة حرارة الماء البارد.

ويمكن صياغة الحمل الحراري لتسخين الماء لمبنى سكن لمدة شهر في

الصورة

ح = ح ش أن ص (د غ - د ب)

حيث ح ش = حجم الماء الساخن اللازم لمدة شهر.

### مشكلة التآكل الكيميائي:

التآكل الكيميائي مشكلة حقيقية لا تختص فقط بالمجمعات، ولكن بكل منظومات التسخين التي تعمل بمائع، وله أهمية خاصة في المجمعات ذات صفائح الامتصاص الألومنيومية، والمنظومات ذات المواسير من الألومنيوم، ويهملنا الأشكال التالية من التآكل الكيميائي.

(١) التأكسد: ويمكن منع التأكسد بإزالة الأكسجين المذاب في السائل الناقل للحرارة وبمنع تعريض هذا السائل للجو، ويمكن تحقيق ذلك بتطبيق منظومة مغلقة.

(٢) التآكل عن طريق التبادل الأيوني: يمكن أن تتسبب أيونات المعادن الثقيلة في مائع المجمع، في حدوث تنقير كيميائي **Pitting**، ويستفحل خطر التنقير بوجود أيونات الكلور في المحلول المائي، والتي قد يرجع وجودها إلى المياه الآتية من المصدر أو إلى مساعدات الصهر المستخدمة في لحام المواسير، وقد تتجم أيونات المعادن الثقيلة من التآكل في أجزاء أخرى من المنظومة (وقد تحتوى عليها مياه المصدر الرئيسى)، وتساعد إضافة مواد مانعة للتآكل إلى المائع الناقل للحرارة على كبح هذا التبادل الأيوني، ومن أهم المواد المانعة للتآكل الكيميائي:

أ - ميتاسيليكات الصوديوم (وهو مانع تآكل عام الاستخدام مع النحاس الأحمر والحديد والبيريليوم).

ب - أورثوفوسفات الصوديوم (ويستعمل لحماية الحديد والألومنيوم).

ج - نيترات الصوديوم (ويستعمل لحماية الحديد والألومنيوم ومواد اللحام).

د - كرومات الصوديوم والبوتاسيوم وما إليها (وهي موانع تآكل عامة للاستخدام مع الألومنيوم والحديد والنحاس الأحمر).

(٣) التآكل عن طريق التأثير الجلفانى **Galvanic action**، حينما يتلامس معدنان مختلفان في محلول كهربى، فعند اقتران النحاس الأحمر والألومنيوم، يعمل النحاس الأحمر بمثابة المهبط ويتسارع تآكل الألومنيوم.

٤) التآكل عن طريق التشقق أو التصدع، وفي هذه الحالة يتسارع تآكل المعدن محدثاً ثغرة أو شقاً، وقد يرجع السبب فيه إلى سوء التركيب أو زيادة مادة مانع التسرب أو ترسبات من الصدأ أو انسدادات أو اضطراب فى السريان.

وتتلخص آلية هذا التآكل التصدعى فى أن الأكسجين الذى سرعان ما ينفذ داخل الخلية، يكون مصعدا anode وإذا كان هناك وفرة فى الأكسجين خارج الصدع فيمكن أن تقوم المساحة خارج الصدع مقام المهبط، وينشط الحيز الصغير داخل الشق مما يفضى إلى تآكل كيميائى سريع، ويمكن الحد من هذا النوع من التآكل بالتصميم السليم والتركيب الصحيح للمعدات لإزالة أية مواد متخلفة قد تؤدي إلى انسداد المجرى.

### المبادلات الحرارية:

فى المنظومات غير المباشرة يلزم مبادل حرارى فى صهرىج التخزين، يعمل على فصل الماء المناسب خلال المجمع عن الماء الذى يسرى إلى الصنابير داخل المنزل، وبطبيعة الحال لابد وأن يسمح المبادل للحرارة التى يمتصها الماء فى المجمع بالسريان إلى الماء المختزن فى الصهرىج.

وما من مبادل حرارى بمقدوره أن ينقل كل الحرارة الممتصة فى الدائرة الابتدائية إلى الدائرة الثانوية، وعادة ما يتم تبادل من ٦٠ إلى ٩٠% منها، وعلى ذلك فإن قسماً لا يستهان به من الطاقة الشمسية التى يتم تجميعها لا يصل على الإطلاق إلى صهرىج التخزين من جراء انخفاض كفاءة المبادل الحرارى، ومن ثم يتعين النظر بعين الاعتبار إلى العوامل التى تؤثر على أدائه، وتعتمد كمية الحرارة المنتقلة عبر المبادل الحرارى على أربعة عوامل:

أ) فروق درجات الحرارة بين الماء الساخن المناسب لداخل المبادل والماء اللازم تسخينه بصهريج التخزين.

ب) معامل التوصيل الحرارى لمادة المبادل الحرارى، وللمعادن عمومًا وللنحاس بصفة خاصة توصيلية حرارية عالية.

ج) مساحة سطح المبادل، فكلما زادت المساحة المشتركة ما بين الماء الساخن والبارد زادت كمية الحرارة المنتقلة بينهما.

د) معدل سريان المياه، فكلما زاد معدل مرور المياه بالمبادل زادت كمية الحرارة المتبادلة خلاله.

### موضع تركيب المبادل الحرارى:

ينبغي أن يركب المبادل الحرارى عند قاع صهريج التخزين الشمسى حيث يستقر الماء الأكثر برودة، وحيث يكون أقصى فرق فى درجات الحرارة، ومن ثم يعمل المبادل بأعلى قدر من الفاعلية.

### مادة تصنيع المبادل الحرارى ومساحة سطحه:

النحاس الأحمر هو أفضل المواد لتصنيع المبادل الحرارى، وفى منظومة تناسب الاستعمال المنزلى تبلغ مساحة سطح المبادل الحرارى نحو ٠,٢ - ٠,٣ متر مربع لكل متر مربع من مساحة سطح المجمع، ولكل متر مربع من سطح المجمع تلزم ٤ أمتار طولية من المواسير ذات قطر ١٥ مم، ٣ أمتار طولية من المواسير ذات قطر ٢٢ مم لتصنيع المبادل.

## الشكل الهندسى للمبادل الحرارى:

يؤثر الشكل الهندسى للمبادل الحرارى على معدل سريان الماء الذى يمر خلاله، فالأكواع الحادة تزيد من معاوقة السريان وتبطئ منه، فيقل بالتالى معدل التبادل الحرارى، وعلى ذلك فيفضل استعمال الانحناءات السلسة المتدرجة.

ولهذا الاعتبار أهمية خاصة فى النظم الحرارية السيفونية، والتي يكون فيها السريان بطبيعته أكثر بطئاً، وفى المنظومات المحتوية على مضخات، حيث يسهل التغلب على معوقات السريان يفيد كثيراً استخدام الأكواع فى المبادلات الحرارية، إذ أنها تزيد من إحداث سريان مضطرب مما يرفع من التبادل الحرارى، وهناك حل أيسر يتلخص فى استعمال مواسير ذات أقطار داخلية صغيرة للغاية، يسهل تشكيلها إلى الصورة المطلوبة من أمتار من ماسورة قطرها ١٠ مم لكل متر مربع من سطح المجمع.

## تدفئة المنازل بالطاقة الشمسية:

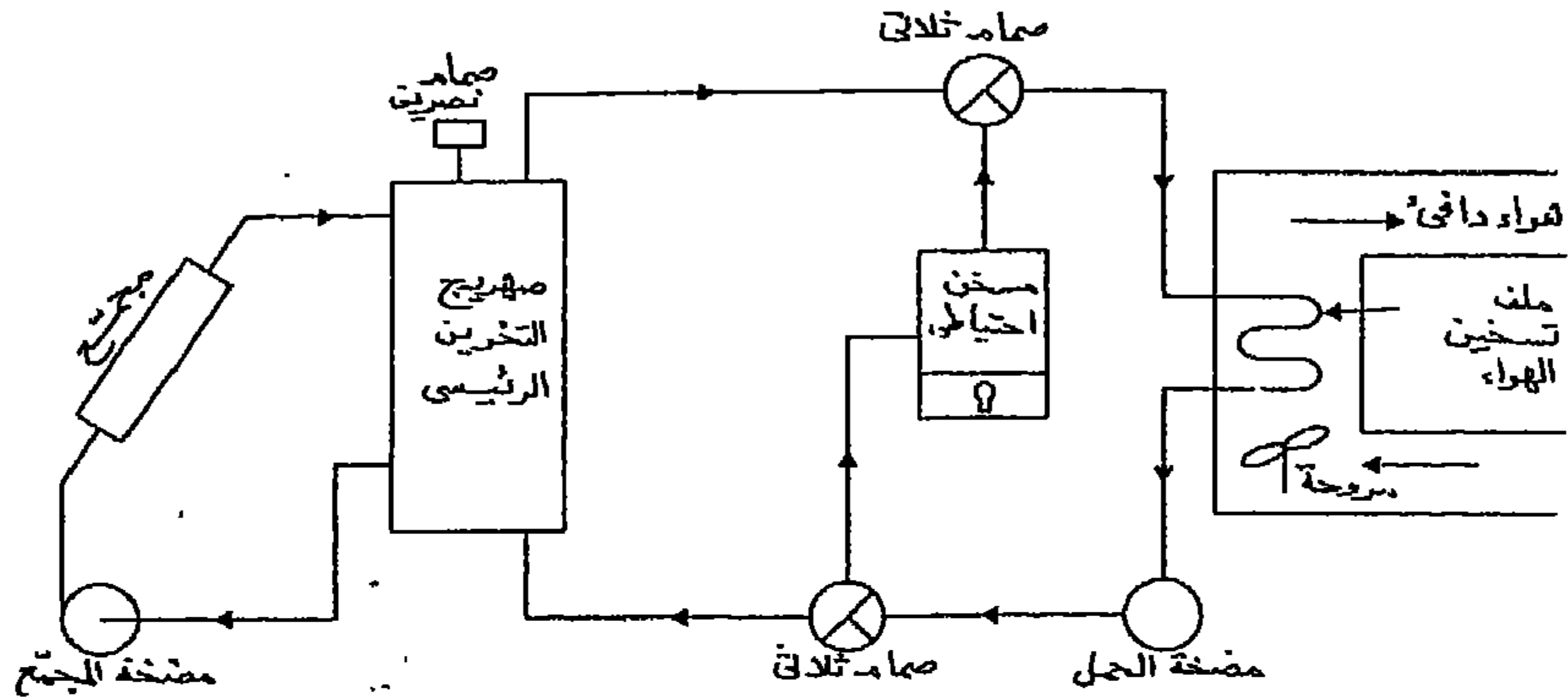
هناك فئتان من منظومات تدفئة الأماكن شمسياً: التدفئة الإيجابية والتدفئة السلبية، ففي المنظومات الإيجابية يجمع الإشعاع الشمسى بواسطة مجمع ذى تصميم خاص، وتخزن الطاقة الحرارية فى جهاز تخزين خاص، وعادة ما يجرى نقل المائع ناقل الحرارة بوسيلة ميكانيكية، أما فى المنظومة السلبية فيسمح للإشعاع الشمسى بدخول المبنى رأساً من خلال فتحات شفافة كبيرة، أى تقوم هياكل وأجزاء البناء ذاتها بتجميع الطاقة الشمسية وتخزينها.

## منظومات التدفئة الإيجابية للمنازل بالطاقة الشمسية:

يوضح شكل (٤ - ١٢) رسماً تخطيطياً لمنظومة تدفئة منزلية نمطية بالطاقة الشمسية، إذ تستخدم مجمعات للطاقة الشمسية ذات ألواح مسطحة ومائع سائل لامتصاص الطاقة الشمسية وتحويلها لحرارة إلى الوسط الذى ينقلها، ويستعمل الماء سواء كوسيلة لنقل الحرارة أو لتخزينها، ويضخ الماء الساخن إلى

صهريج التخزين تمهيدا لسريانه إلى الحيز المطلوب تدفئته، ويتكامل مع هذه المنظومة الشمسية مسخن تقليدي يعمل بالوقود الأحفوري كمصدر احتياطي للطاقة عندما يقصر الجهاز الشمسي في تلبية احتياجات المبنى بسبب الطقس الغائم أو البارد، ويزود المبنى بالحرارة من خلال الهواء الدافئ الذي يدفعه ضاغط هواء مركزي ومبادل حراري ما بين الماء والهواء.

ويقوم التحكم في منظومة التدفئة هذه على إشارتين لدرجة الحرارة، تؤثر إحداهما فرق درجات الحرارة بين المجمع وصهريج التخزين وتؤثر الأخرى درجة حرارة الغرفة، وحينما يتخطى فرق درجتى الحرارة ما بين لوحة المجمع الماصة وقاع صهريج التخزين ست درجات مئوية، تشغل مضخة المجمع وتستمر في العمل حتى يقارب فرق درجات الحرارة الصفر وعندها تتوقف المضخة، وعند احتياج الغرفة للتدفئة، تشغل مضخة الحمل فتسحب الماء المسخن من صهريج التخزين الرئيسى لتلبية هذه الحاجة، وإذا لم تكف الطاقة في صهريج التخزين حجم الحمل المطلوب، فإن مرحلة أعلى من جهاز ضبط درجة الحرارة تحفز منظومة التحكم الآلى على تشغيل مسخن الطوارئ ليغطي الفارق الحراري اللازم.

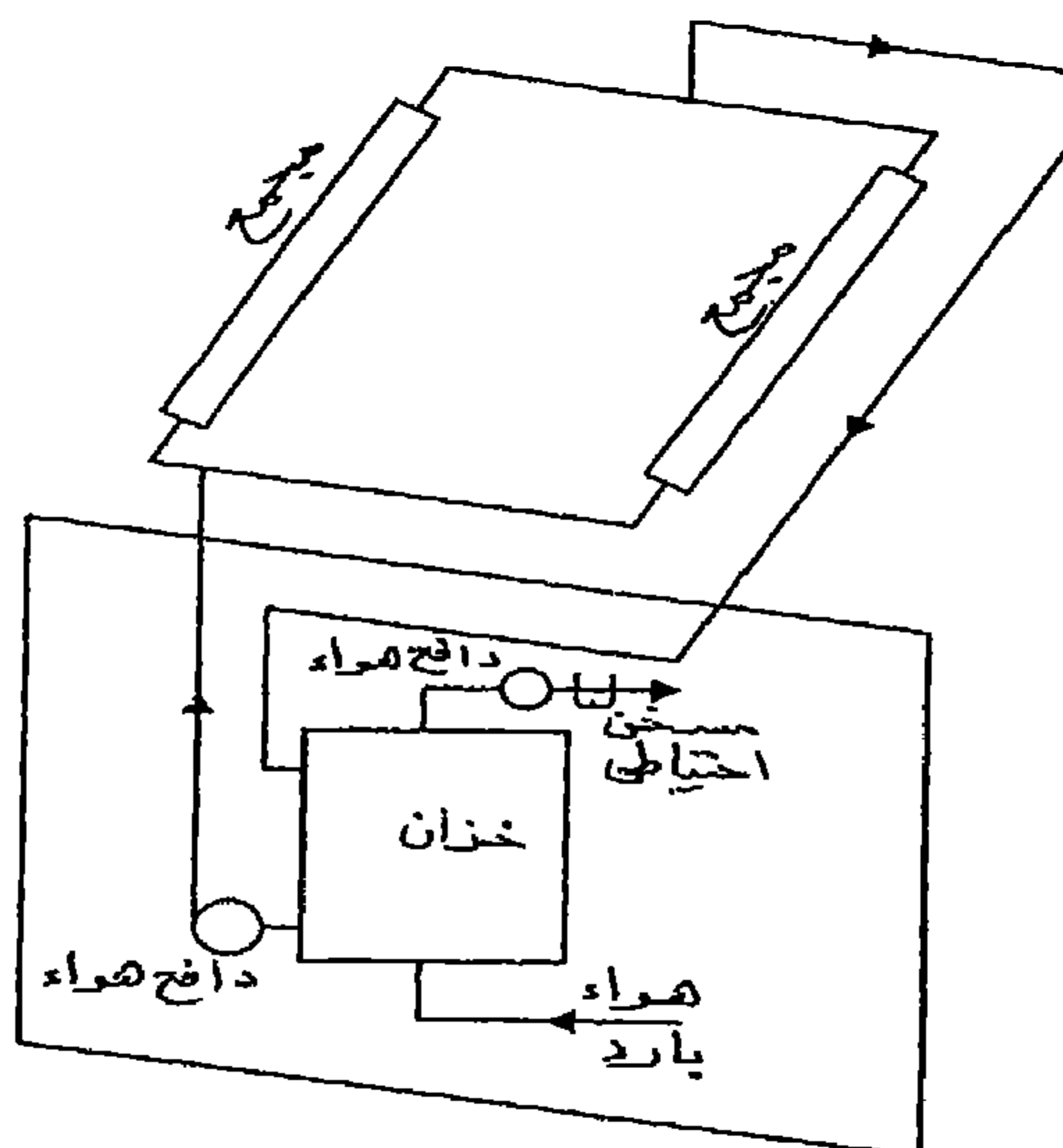


شكل (٤ - ١٢)

رسم تخطيطي لنظام تدفئة شمسي ذي وسط ناقل سائل



ويبين شكل (٤ - ١٣) نظام تدفئة شمسيًا بالهواء، وفي هذه الحالة يدفع الهواء المسخن من المجمع بضغط هواء إلى الحيز المطلوب تدفئته، وتستخدم طبقة من الحصى بالأرضية في هذه المنظومة كوسيلة تخزين للطاقة، ويتسم استخدام طبقات من الحصى بميزة وجود تراكب تدرجي قاطع بين درجات الحرارة عبر طبقات الحصى بما يضمن درجة حرارة دخول منخفضة إلى المجمع، وبالتبعية تحسين كفاءة أداء منظومة التسخين بالهواء.



شكل (٤ - ١٣)

رسم تخطيطي لنظام تدفئة مبنى باستعمال مسخن شمسي للهواء

وهناك مزايا نسبية لكل من منضخات التدفئة الشمسية بالماء أو بالهواء، فالمنظومات المائية دائماً ما تواجه مشاكل ومخاطر مثل احتمال تجمد المجمع، أو غليان الماء فيه، وتأثيرات الماء في التآكل الكيميائي والتسرب العارض.

والحرارة النوعية للماء تزيد كثيراً عن تلك الخاصة بالهواء وشبكة الأنابيب ومعدات التخزين مع المنظومة المائية أقل حجماً من نظيرتها مع منظومات الهواء، وللحصول على نفس السعة التخزينية يلزم لمنظومة التدفئة بالهواء ثلاثة أمثال الحجم اللازم للتدفئة بالماء.

### منظومات التدفئة السلبية:

يتعين أن يمثل تصميم منظومة التدفئة السلبية جزءاً متكاملاً من عملية التخطيط المعماري، بما في ذلك مسائل اختيار الموقع واتجاه المباني ومواصفات المواد، وهناك ثلاثة أنواع نمطية ومتميزة من تصميمات التدفئة السلبية هي:

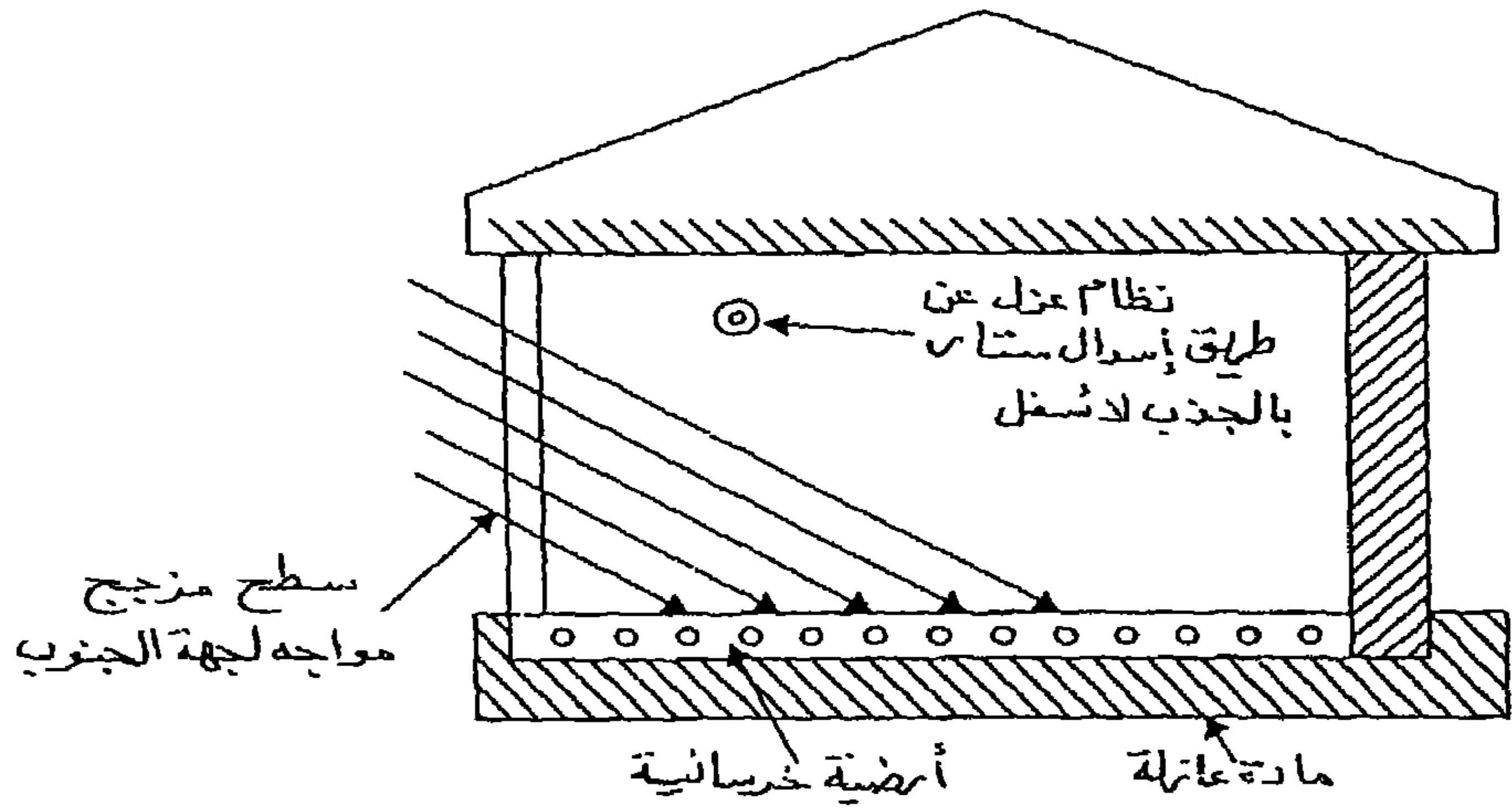
التأثير المباشر والتأثير غير المباشر وتأثير الدفينة (الاحتباس الحراري).

في منظومة التدفئة السلبية من النوع ذي التأثير المباشر يسمح لضوء الشمس أن ينفذ رأساً عبر نوافذ واسعة ذات زجاج مزدوج ومواجهة لجهة الجنوب إلى الحيز المطلوب، حيث يصطدم بالمبنى وبهيكله الداخلي ذي الكتلة الضخمة ويتحول إلى طاقة حرارية، وتساعد الكتل الهيكلية على تعديل التطرف في درجات الحرارة داخل المبنى بتخزين فائض الطاقة الحرارية خلال النهار وإطلاقها خلال الليل، ولمنع تسرب الحرارة من الأجسام الحرارية بالداخل إلى الوسط الخارجي يحذف عزل المبنى حرارياً من الخارج، ويلزم كذلك عزل قاع بلاطات الأرضية لعزل داخل المبنى عن الأرض، وبشكل (٤ - ١٤) توضيح لمنظومة تدفئة سلبية بسيطة من نوع المردود المباشر ذات أرضية خرسانية معزولة وستائر عازلة تسدل بالجذب إلى أسفل.

وأطراف تصميمات التدفئة السلبية غير المباشرة جاذبية، هي الجدار المخزن الممتص، أو حائط ترومب (\*) Trombe wall، وهو جدار سميك من الخرسانة مواجه للجنوب ومقام رأساً خلف لوح زجاجي مفرد أو مزدوج مع وجود حيز من الهواء بين الزجاج، والسطح الخارجي للجدار المطلي بطلاء أسود (شكل ٤ - ١٥).

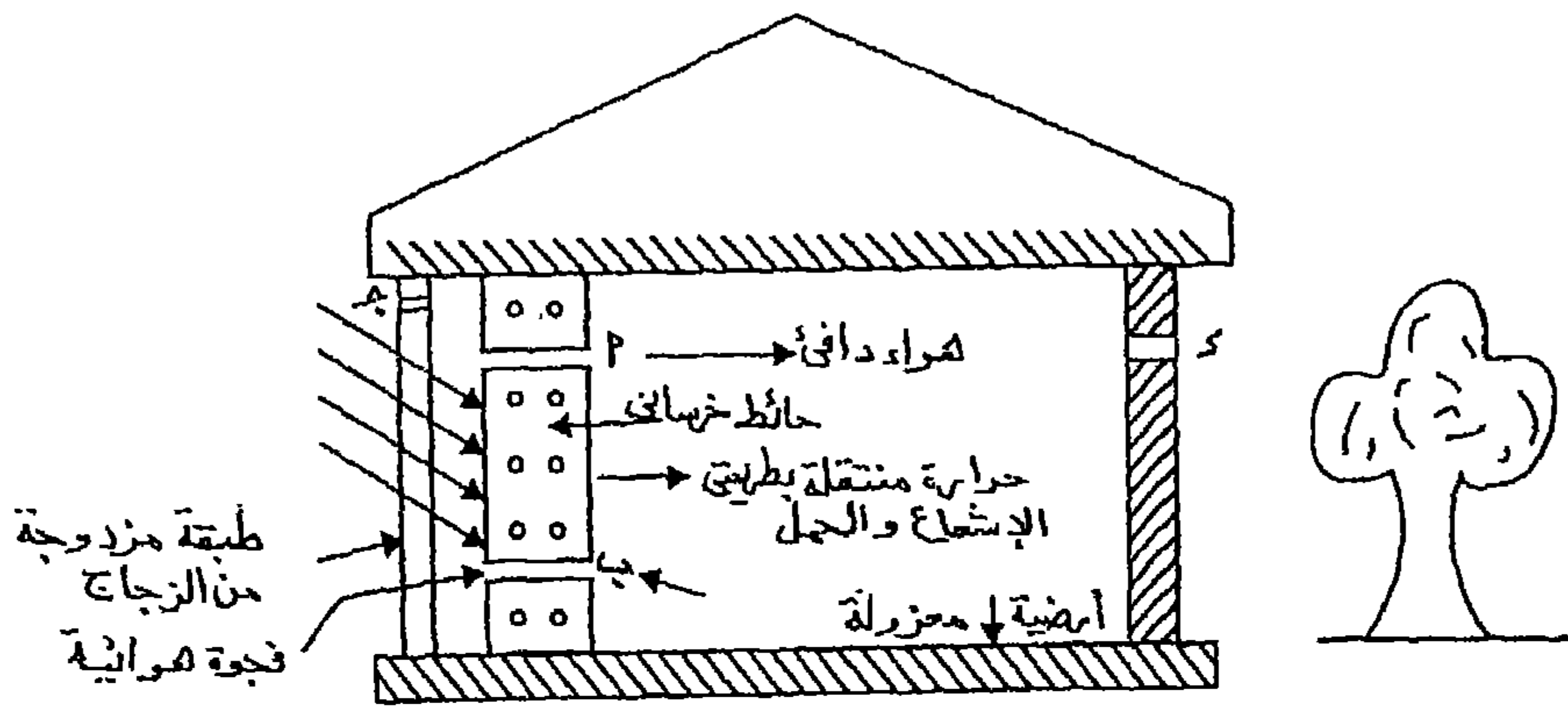
---

(\*) نسبة إلى مخترعه المهندس الفرنسي ترومب (عام ١٨٨١) (المترجم)



شكل (٤ - ١٤)

منظومة تدفئة سلبية من طراز المردود المباشر



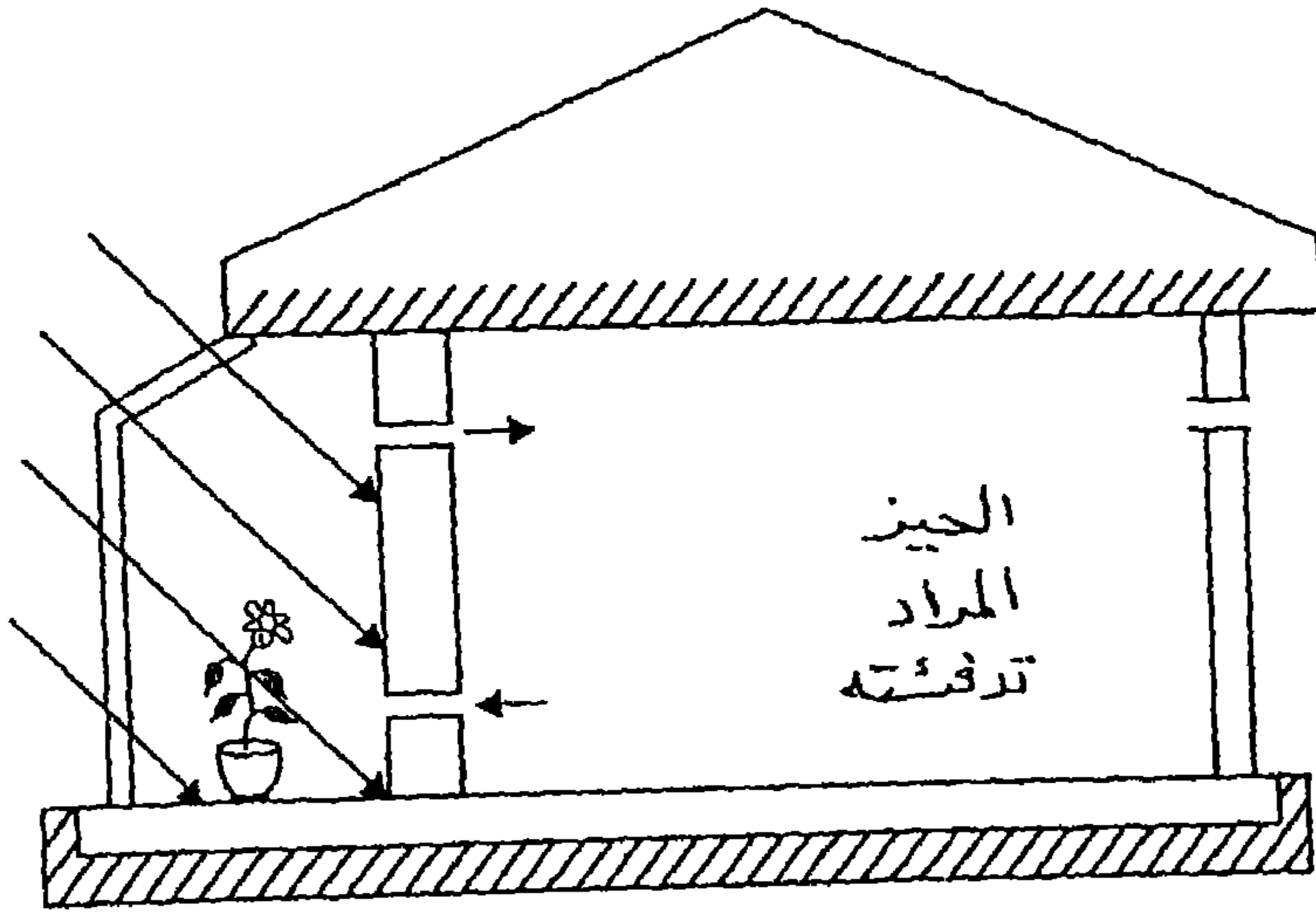
شكل (٤ - ١٥)

منظومة تدفئة سلبية غير مباشرة ذات حائط ممتص ومختزن

والفتحتان (أ)، (ب) اللتان يمكن فتحهما أو غلقهما موجودتان قرب أعلى الحائط الخرساني المختزن وقرب أسفله، ففي أثناء النهار تبقى كلتا الفتحتين مفتوحة، ويسخن الهواء ما بين الزجاج الداخلي والجدار، وينساب إلى داخل الحجرة من خلال الفتحة العليا، وفي ذات الوقت ينسحب الهواء البارد من الغرفة إلى خارجها من خلال الفتحة السفلى، وبذلك تنشأ دورة من تيارات الحمل الطبيعية، كما يجرى انتقال للطاقة إلى الحجرة عن طريق الإشعاع من الوجه الداخلي للجدار المختزن، وإبان الليل تغلق كلتا الفتحتين وتنتقل الطاقة عن طريق الإشعاع فحسب.

ويتيح هذا التصميم بالمثل وسيلة للتهوية صيفاً، ففي الأيام الصيفية الحارة تفتح الفتحات (ب)، (ج)، (د)، في حين تغلق الفتحة (أ)، فينسحب الهواء الساخن من بين الزجاج الداخلي والجدار خلال الفتحة (ج) ساحباً معه هواء الحجرة، ونتيجة لهذا ينسحب الهواء من الخارج خلال الفتحة (د) التي ينبغي أن يكون موضعها بحيث يأتي الهواء الذي ينسحب خلالها من منطقة ظليلة وباردة.

والدفينة المبينة بشكل (٤ - ١٦) تجمع ما بين ملامح منظومات التدفئة السلبية المباشرة وغير المباشرة، فالدفينة ذاتها تسخن مباشرة بفعل أشعة الشمس، ويسخن داخلها بطريقة غير مباشرة من خلال انتقال الحرارة بالتوصيل إلى الداخل عبر الجدار المقسم، ويمكن أن يجلب الهواء الدافئ المنتقل من الدفينة إلى الحيز المراد تدفئته عبر فتحات الجدار الفاصل تدفئة إضافية، وعندما يصنع الجدار الفاصل من مادة شفافة تتحقق التدفئة المباشرة لداخل الحيز، وفي هذه الحالة يتحتم بالقطع استعمال عازل فوق الجدار الشفاف ليلاً.. ولمنع تجاوز التدفئة للحدود المعقولة صيفاً لا بد أن تزود الدفينة بفتحات خارجية في موضع مرتفع كوسيلة لطرد الحرارة.



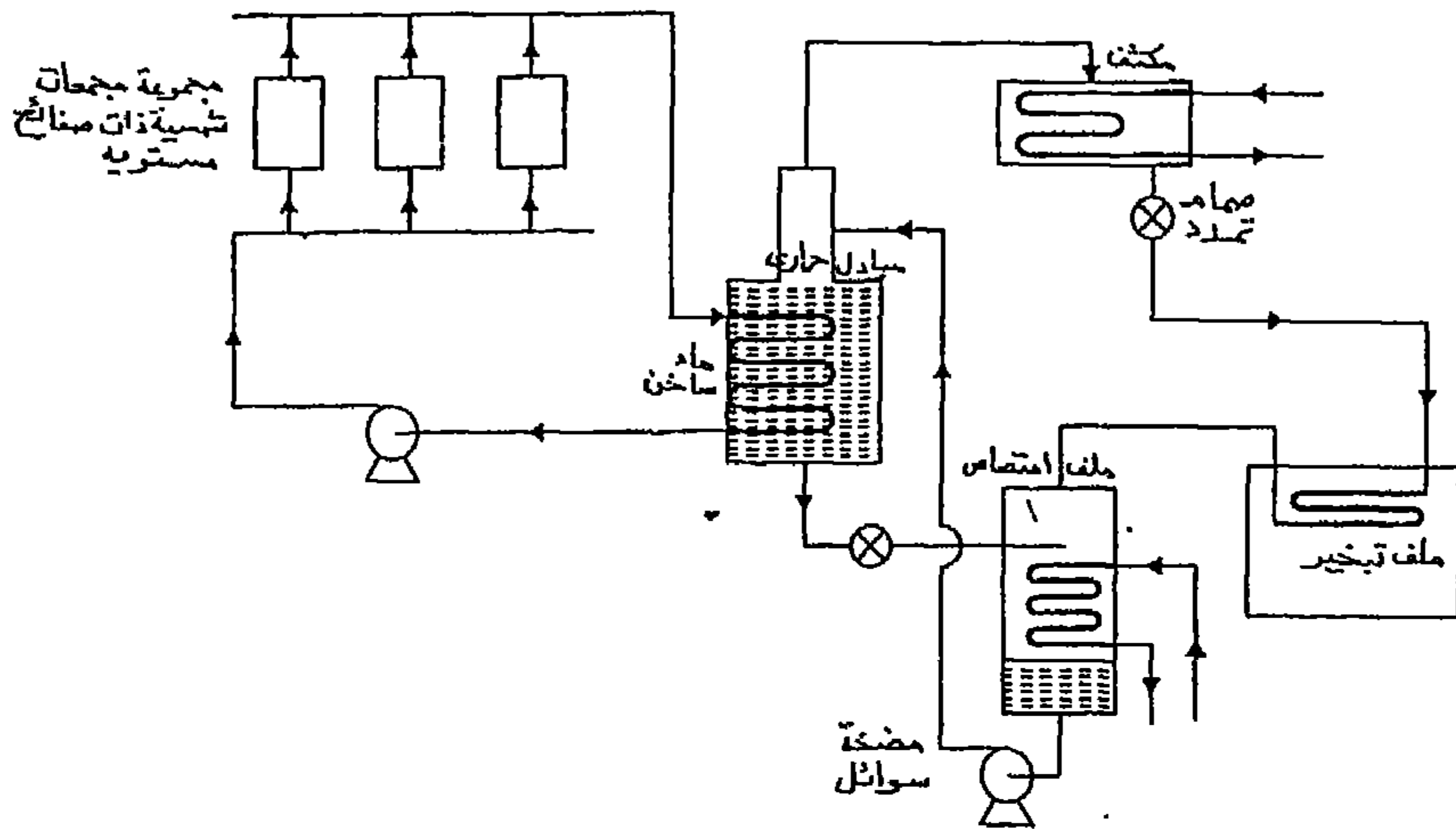
شكل (٤ - ١٦)

منظومة تسخين سلبية بتأثير الدفينة

### تبريد الأماكن:

لما كانت الحاجة إلى التبريد - سواء للأماكن السكنية أو للمواد الغذائية - تتعاظم بصفة عامة في أوقات الحد الأعلى للإشعاع الشمسي، فإن التغيرات الموسمية في تعرض سطح الأرض للشمس تتوافق توافقاً طيباً مع الحاجة إلى التبريد لتوفير الراحة للبشر ولحفظ المأكولات، على أية حال، فالعيوب التي تكتنف استغلال طاقة الإشعاع الشمسي، من حيث طبيعتها المتقطعة وانخفاض درجة تركزها، تجعل من الضروري تصميم أجهزة اقتصادية لتخزين الطاقة الشمسية وصرفها عند الحاجة بحيث تتغلب على العديد من العقبات العسيرة، ويتجلى هذا الأمر بصفة خاصة في حالات استخدام الطاقة الشمسية في أغراض التبريد مقارنة باستخدامها للتسخين، بالنظر أساساً إلى الحاجة إلى مصدر حراري ذي درجة حرارة مرتفعة نسبياً لعمليات التبريد.

ونرى فى شكل (٤ - ١٧) رسماً تخطيطياً لمنظومة تثلّيج بسيطة تعمل بامتصاص الطاقة الشمسية، وفيها يمر الماء من وحدات من مجمعات طاقة ذات ألواح مستوية خلال مبادل حرارى (يسمى بالمولد)، حيث تنتقل الحرارة إلى محلول هو خليط من المادة الماصة والمادة المثلجة (والخليط غنى بالوسيط المثلج)، وتحت ضغط مرتفع يتجه بخار الوسيط المثلج (وهو يغلى) إلى مكثف حيث يتكثف إلى سائل تحت ضغط عال، يمر بدوره خلال صمام خانق throttling فيتمدد إلى ضغط ودرجة حرارة منخفضين، ويمر خلال ملف مبخر evaporator coil. ولدى هذه المرحلة يمتص بخار مادة التثلّيج الحرارة، وبناء على ذلك يبرد الفراغ المحيط بالملف، ويمتص بخار مادة التثلّيج داخل خليط محلولي يتم سحبه من المولد حيث التركيز الضعيف فى مادة التثلّيج، ويعاد ضخه مرة أخرى إلى المولد، وبهذا تستكمل الدورة، ومن أمثلة الخليط من مادتي التثلّيج والامتصاص التى يشيع استعمالها ماء الأمونيا مع ماء بروميد الليثيوم، ويستعمل بروميد الليثيوم فى أغراض تكييف الهواء، وتتراوح قيمة معامل الأداء (وهو النسبة ما بين التأثير التلّيجي الحادث، والحرارة الداخلة إلى المولد) ما بين ٠,٨ ، ٠,٥



شكل (٤ - ١٧)

منظومة تثلّيج شمسية بالامتصاص

## التقنية الشمسية الكهروحرارية:

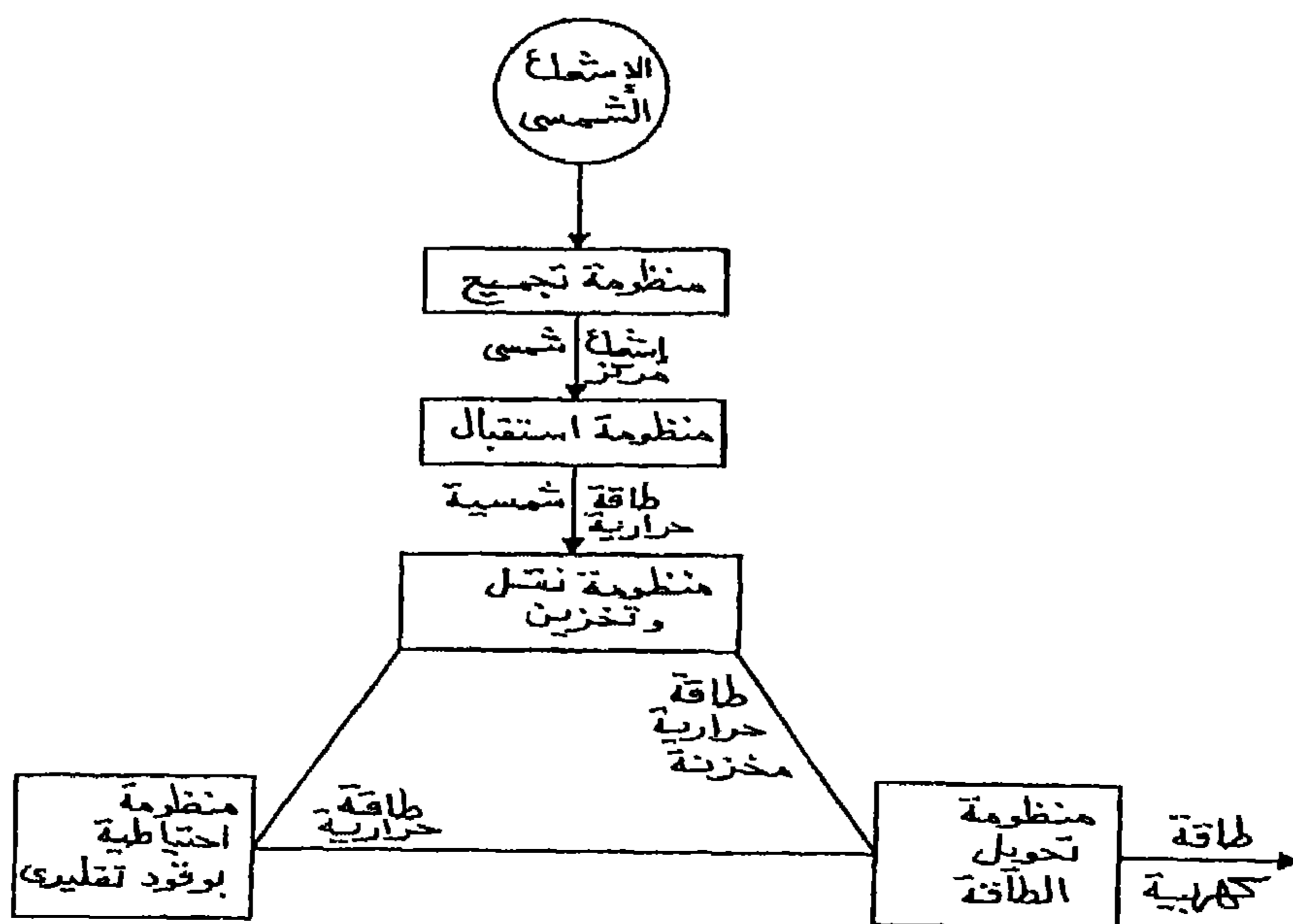
الضوء الشمسي هو أعظم مصادر العالم للطاقة، ولآلاف السنين استعملت الحضارة البشرية بفعالية الطاقة الشمسية - دون تركيزها - في إنتاج الضوء والحرارة وفي استنبات المحاصيل الغذائية، وتتطور تقنيات اليوم صوب تركيز ضوء الشمس، وتسخير طاقته في أغراض أخرى كتوليد الكهرباء، والبخار والماء الساخن للعمليات الصناعية.

ورغم أن أشعة الشمس المباشرة والانتشارية يمكن حشدها في مصفوفات من المجمعات واستعمالها في تدفئة المنازل أو إمدادها بالماء الساخن، إلا أن الأشعة دون تركيزها لا تكون بالشدة الكافية لتوليد القوى المحركة بالكفاءة اللازمة، ويستوجب ذلك أن تركز التقنيات الشمسية الكهروحرارية، قدرًا كبيرًا من ضوء الشمس على مساحة أصغر بما يسمح بتعظيم مقدار الحرارة المتاحة في درجات حرارة عالية، والتي يمكن أن تتحول بدورها إلى كهرباء في آلة حرارية تقليدية، وتعتمد محطات القوى الشمسية الحرارية على ضوء الشمس المباشر، ومن هنا يتعين إقامتها بالمناطق ذات الإشعاع الشمسي المباشر، ويبلغ مقدار الإشعاع الشمسي المتاح عند سطح الأرض - في أقصى شدته - زهاء ١ كيلو وات للمتر المربع، ويتيح هذا لمحطات القوى الشمسية التي أحسن اختيار مواقعها نمطيًا ٢٥٠٠ كيلو وات ساعة لكل متر مربع من أشعة الشمس سنويًا - كحد أدنى - ويكافئ ذلك قيمة متوسطة يومية لضوء الشمس مقدارها ٦,٨ كيلو وات ساعة / م<sup>٢</sup>.

## تقنيات المنظومات الحرارية الشمسية:

تعتمد كل تقنيات توليد القوى الحرارية الشمسية على أربع منظومات: المجمع - المستقبل (أو المتلقي) - النقل والتخزين، وتحويل الطاقة (شكل ٤ - ١٨)، ويقتصر المجمع الإشعاع الشمسي ويركزه وينقله إلى المستقبل الذي يمتص

ضوء الشمس المركز وينقل الطاقة الحرارية إلى المائع الوسيط، وتتولى منظومة النقل والتخزين توصيل المائع من المستقبل إلى منظومة تحويل الطاقة. وفي بعض محطات القوى الشمسية - الحرارية يدخر جزء من الطاقة الحرارية للاستعمال المستقبلي، وتتركب منظومة تحويل الطاقة من آلة حرارية والمعدات المتعلقة بها من أجل تحويل الطاقة الحرارية إلى كهربية، وتتضمن بعض التصميمات أيضاً مصدرًا حراريًا ثانويًا يعمل بالوقود الأحفوري يمكنه إما أن يشحن منظومة التخزين أو أن يشغل منظومة تحويل الطاقة في خلال فترات ضعف ضوء الشمس.



شكل (٤ - ١٨)

تعتمد التقنيات الشمسية الكهروحرارية على منظومات

تجميع فاستقبال فتخزين ثم تحويل للطاقة



## أنواع التقنيات الحرارية - الشمسية:

تطورت ثلاث تقنيات حرارية - شمسية رئيسية، تتميز كل منها من حيث شكل السطح ذي المراة الذي يتجمع عليه ضوء الشمس ويتم تركيزه، وهذه التقنيات هي:

(١) منظومة ذات مجرى أو حوض على شكل قطع مكافئ يركز الطاقة الشمسية على مستقبل أنبوبي موضوع على طول الخط البؤري<sup>(\*)</sup> لمجمع الحوض.

(٢) منظومة ذات مستقبل مركزي تستعمل مرايا متحركة تتعقب الشمس (اسمها الهليوستات heliostats وتعكس الطاقة الشمسية على مستقبل / مبادل حراري موضوع على قمة برج).

(٣) منظومة ذات صحن عاكس له شكل قطع مكافئ يتعقب الشمس ويركز ضوءها إما على مستقبل / آلة أو مستقبل / مبادل حراري مركب عند نقطة البؤرة من الصحن.

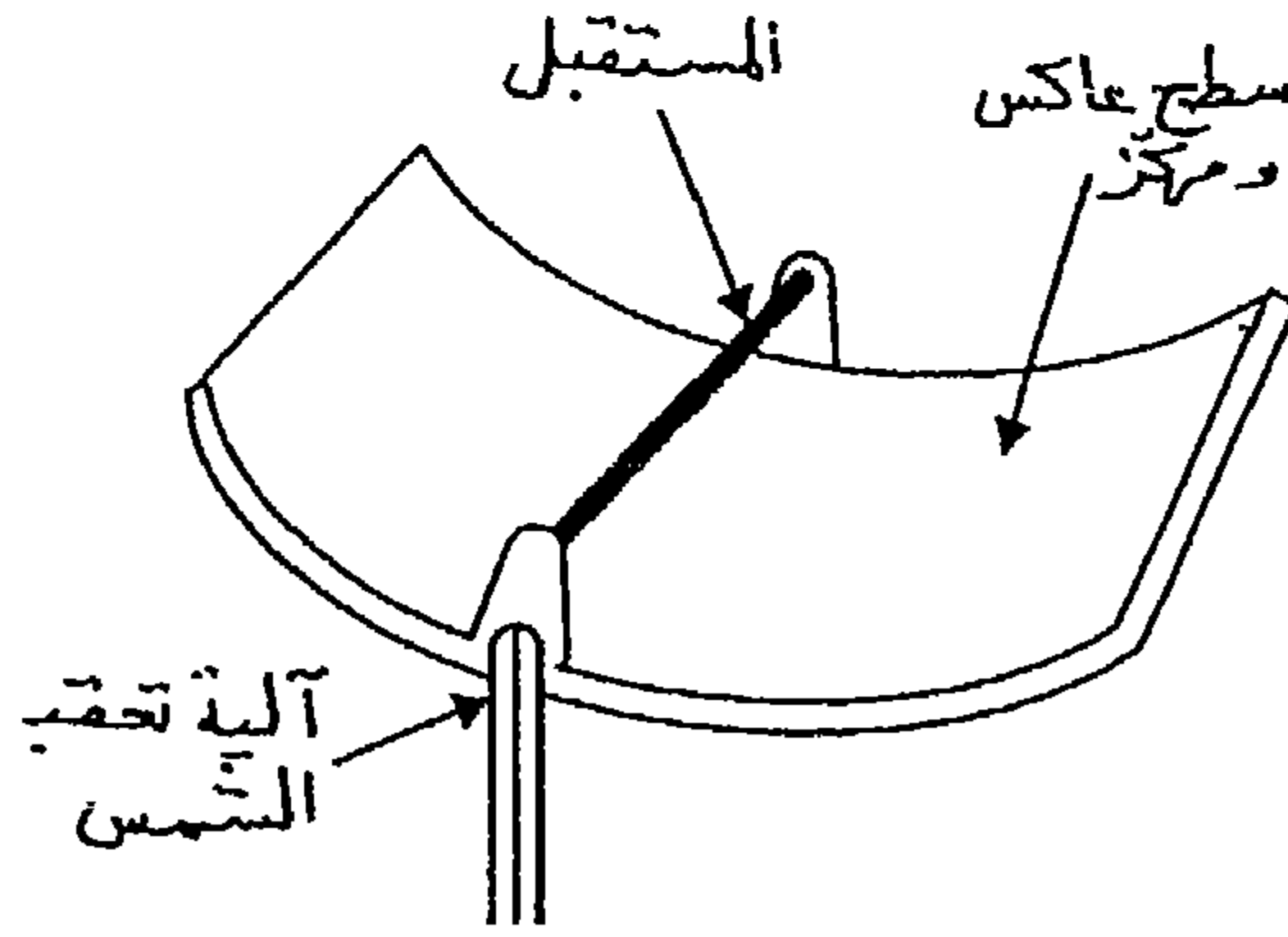
### (١) منظومات المجرى على شكل قطع مكافئ:

المجرى - القطع المكافئ عبارة عن مجمع شمسي خطي يأخذ مقطعه شكل قطع مكافئ ويركز سطحه العاكس ضوء الشمس على مستقبل أنبوبي موضوع بطول خط بؤرة المجرى (شكل ٤ - ١٩ أ) يسخن المائع المار بالأنبوبة وينتقل إلى نقطة مركزية عبر شبكة من المواسير مصممة بحيث تكفل الحد الأدنى من الفقد الحراري، والمجرى على شكل قطع مكافئ له خط بؤري أفقي مفرد، وعلى ذلك فهو يتعقب الشمس بطول محور واحد فقط، إما شمالي - جنوبي أو شرقي -

---

(\*) يقصد بالخط البؤري الخط الذي يمر ببؤرة منحنى القطع المكافئ (المترجم)

غربى، ويحقق الاتجاه الشمالى - الجنوبى طاقة أعلى قليلا مما يحققه الاتجاه الشرقى - الغربى، إلا أن مردوده شتاءً منخفض لدى خطوط العرض المتوسطة، وعلى النقيض من ذلك يكفل الاتجاه الشرقى - الغربى مردودًا أكثر ثباتًا على مدار العام.



شكل (٤ - ١٩ أ)

مجرى بمقطع على شكل قطع مكافئ

## (٢) المنظومات ذات المستقبل المركزى:

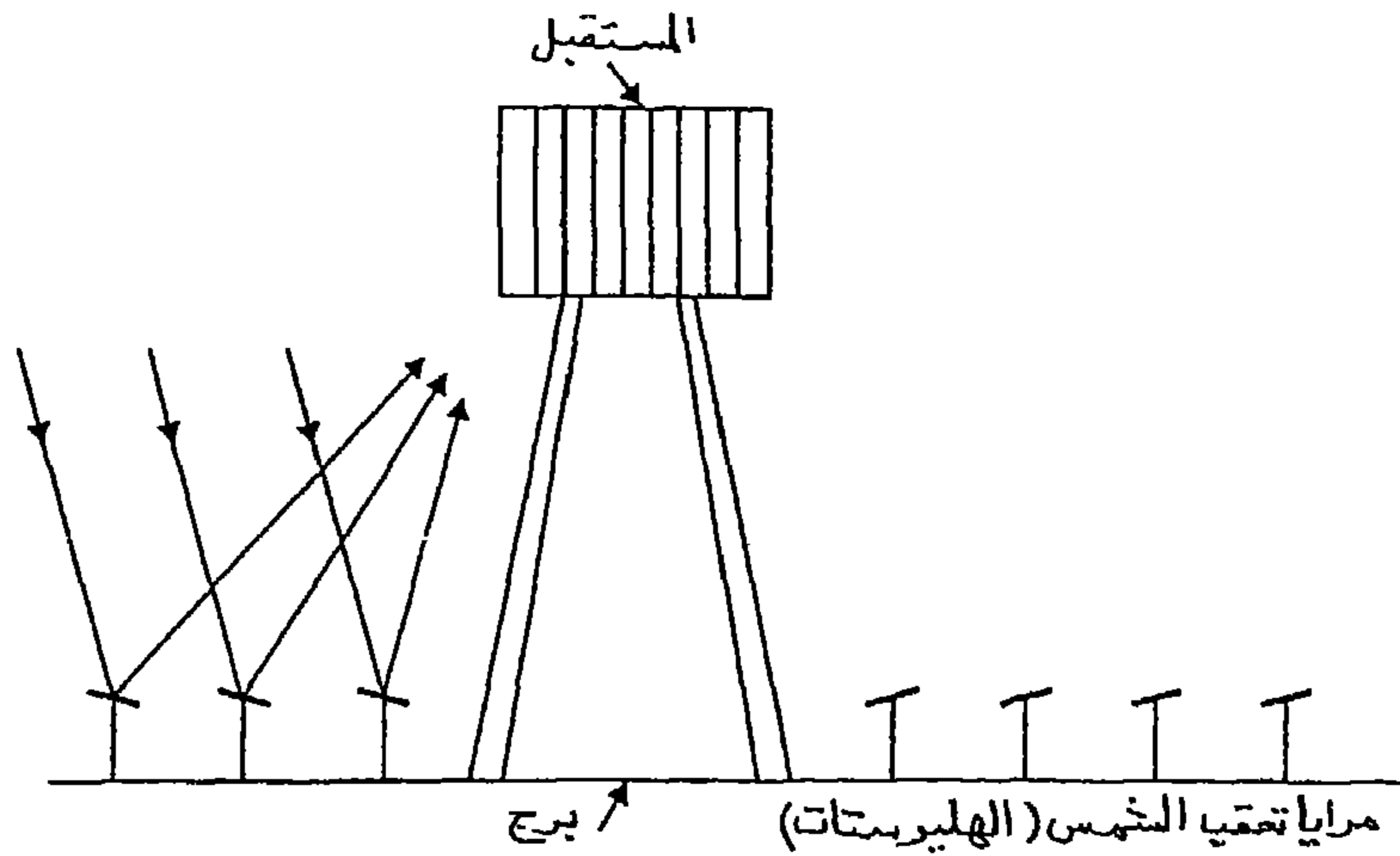
تتكون المنظومة ذات المستقبل المركزى من مرآة متعقبة للشمس، تعكس الطاقة الشمسية على جهاز استقبال مركب فوق برج (شكل ٤-٩ ب)، وتنتقل الطاقة الحرارية التى يمتصها المستقبل إلى مائع دوار فى دورة يمكن تخزينه لاستعماله فيما بعد لتوليد القدرة، وتتسم أجهزة الاستقبال المركزية بالخصائص العديدة التالية:

- (١) تجمع تلك الأجهزة الطاقة الشمسية ضوئيًا وتنقلها إلى مستقبل واحد بما يقلل من متطلبات نقل الطاقة الحرارية إلى أدنى حد.

(٢) تحقق - كنمط شائع - معامل تركيز يتراوح ما بين ٣٠٠، ١٥٠٠، فهي ذات كفاءة عالية سواء في تجميع الطاقة أو في تحويلها إلى كهرباء.

(٣) يسهل عن طريقها تخزين الطاقة الحرارية.

(٤) ذات ساعات كبيرة (تصل عامة إلى ١٠ ميجاوات وأكثر) ويمكن أن تعمل منظومات المستقبل المركزي في درجات حرارة ما بين ٥٠٠، ١٥٠٠ م.



شكل (٤ - ١٩ ب)

جهاز الاستقبال المركزي

(٣) المنظومات بصحن له شكل القطع المكافئ:

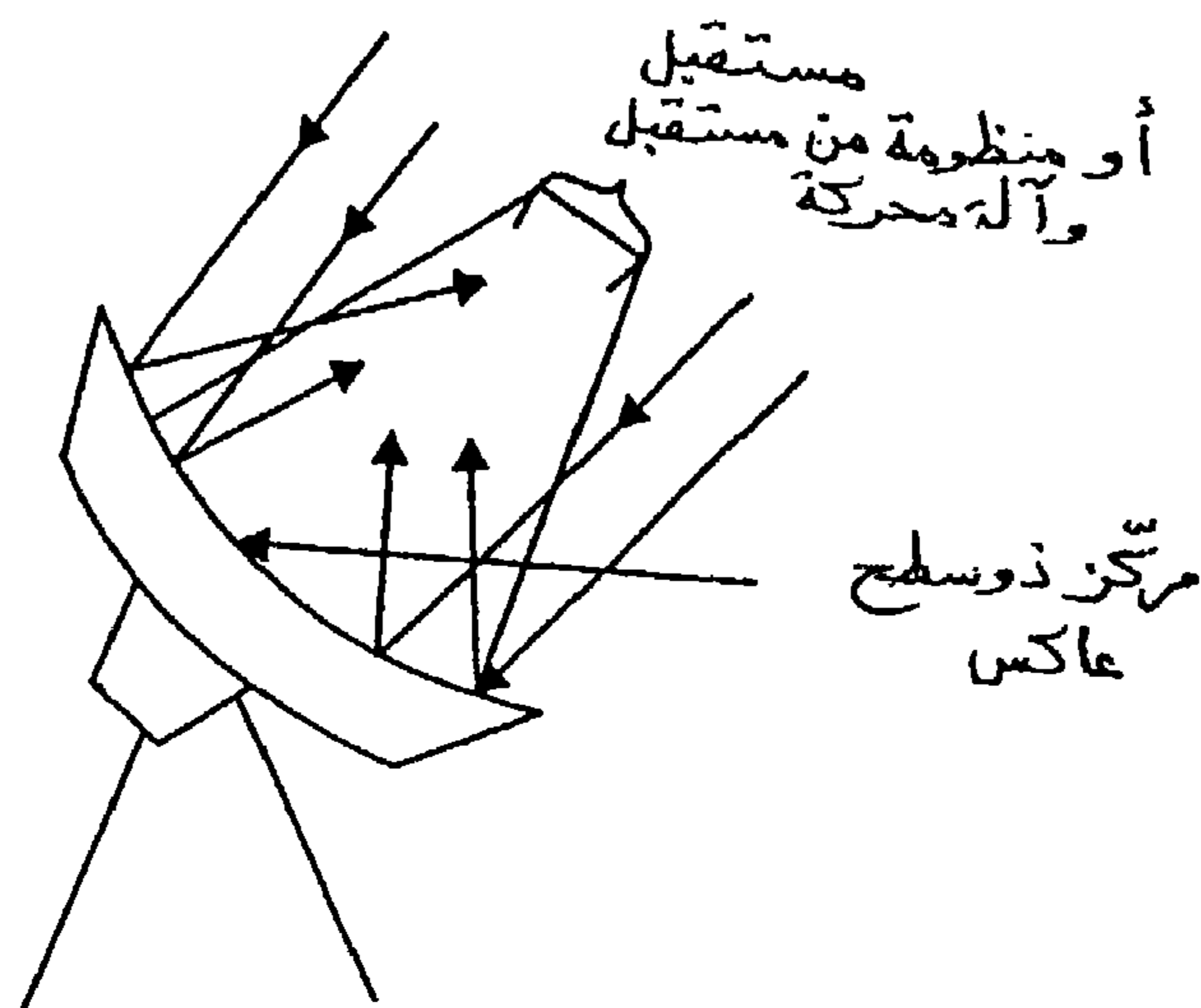
الصحن - القطع المكافئ هو مجمع للأشعة في نقطة بؤرية، يتعقب الشمس في محاورين، ويركز الطاقة الشمسية على جهاز استقبال موضوع عند نقطة البؤرة من الصحن (شكل ٤ - ١٩ جـ). ويمتص المستقبل طاقة الإشعاع الشمسي ويحولها إلى طاقة حرارية من خلال مائع دوار في دورة، ويمكن إما أن تتحول

الطاقة الحرارية بعدئذ إلى كهرباء باستعمال آلة ومولد مقترنين مباشرة بجهاز الاستقبال، أو أن تنتقل في مواسير إلى منظومات مركزية لتحويل الطاقة، والصحن ذات شكل القطع المكافئ لها مزايا عديدة مهمة على رأسها:

(١) نظراً لأنها متجهة دوماً صوب الشمس فهي الأعلى كفاءة بين كل منظومات التجميع.

(٢) تتراوح نسب تركيزها نمطياً بين ٦٠٠ . ٢٠٠٠، أي أنها ذات كفاءة عالية في امتصاص الطاقة الحرارية وتحويلها.

(٣) لها وحدات تجميع واستقبال نمطية قياسية، يمكن أن تشغل إما مستقلة أو كجزء من مجموعة أكبر من الصحن ومنظومات الصحن على شكل قطع مكافئ يمكنها أن تحقق درجات حرارة تتجاوز ١٥٠٠ °م.



شكل (٤ - ١٩ ج)

صحن على شكل قطع مكافئ

والم منظومات ذات المجرى بشكل قطع مكافئ هي الأكثر تطوراً من بين التقنيات الحرارية الشمسية، وتوجد بها الإنشاءات الرئيسية للعمليات الحرارية وإنتاج القوى الكهربائية، ورغم أن المنظومات ذات المجرى تعمل - نمطياً - عند درجات حرارة من ١٠٠ إلى ٤٠٠ °م، وهي تقل كثيراً عن الدرجات التي تحققها منظومات التركيز الأخرى، فإن تصميم المجرى يحقق ميزة المرونة والخبرة التجارية، ولأن كل نموذج قياسي مرتبط بالنماذج القياسية الأخرى من خلال سلسلة متنوعة ودوائر سريان متوازية، فيمكن أن تضبط المنظومة طبقاً لنطاق عريض من منحنيات الأداء.

**الباب الخامس**

**تخزين الطاقة الشمسية**



## مقدمة:

يمكن تخزين الطاقة الشمسية في صورة طاقة كهربية، أو كيميائية - ميكانيكية، أو كيميائية، ويمكن تحويل الطاقة الشمسية عن طريق الفولتية الضوئية - إلى كهرباء يمكن عندئذ تخزينها بصورة أسهل في حاشدات (بطاريات) كهربية كطاقة كيميائية، والطاقة الكهربائية المولدة من الطاقة الشمسية يمكن استعمالها أيضا في التحليل الكهربى للمياه، ويخزن المنتج النهائى من هذا التحليل - وهو الهيدروجين - كوقود للاستعمال المستقبلى، كما يمكن تخزين الطاقة الشمسية فى صورة مائية مختزنة.

والصورة الأكثر شيوعا الآن، هى تخزين الطاقة الشمسية، المحولة إلى طاقة حرارية فى صورة حرارة محسوسة(\*) أو كامنة محتواة فى وسيط سائل أو صلب، واختيار المادة الوسيطة هذه مؤسس على طبيعة العملية الحرارية الشمسية، ففي منظومات تسخين المياه، يكون الماء المخزن هو وسيط تخزين الطاقة، وفى منظومات تسخين الهواء، يجرى تخزين الحرارة المحسوسة فى طبقات من الحصى، والتخزين باستغلال التغيرات الطورية phase change، فى صورة الحرارة المصاحبة للانصهار مجد فى كثير من تطبيقات الطاقة الشمسية، وسيتم بحث هذه الموضوعات فى البنود التالية من هذا الباب.

والسعة التخزينية اللازمة لضمان التشغيل المستمر لمنظومة طاقة شمسية يعتمد على مقدار الإشعاع الشمسى المتاح، وطبيعة العملية الحرارية، والتقييم

---

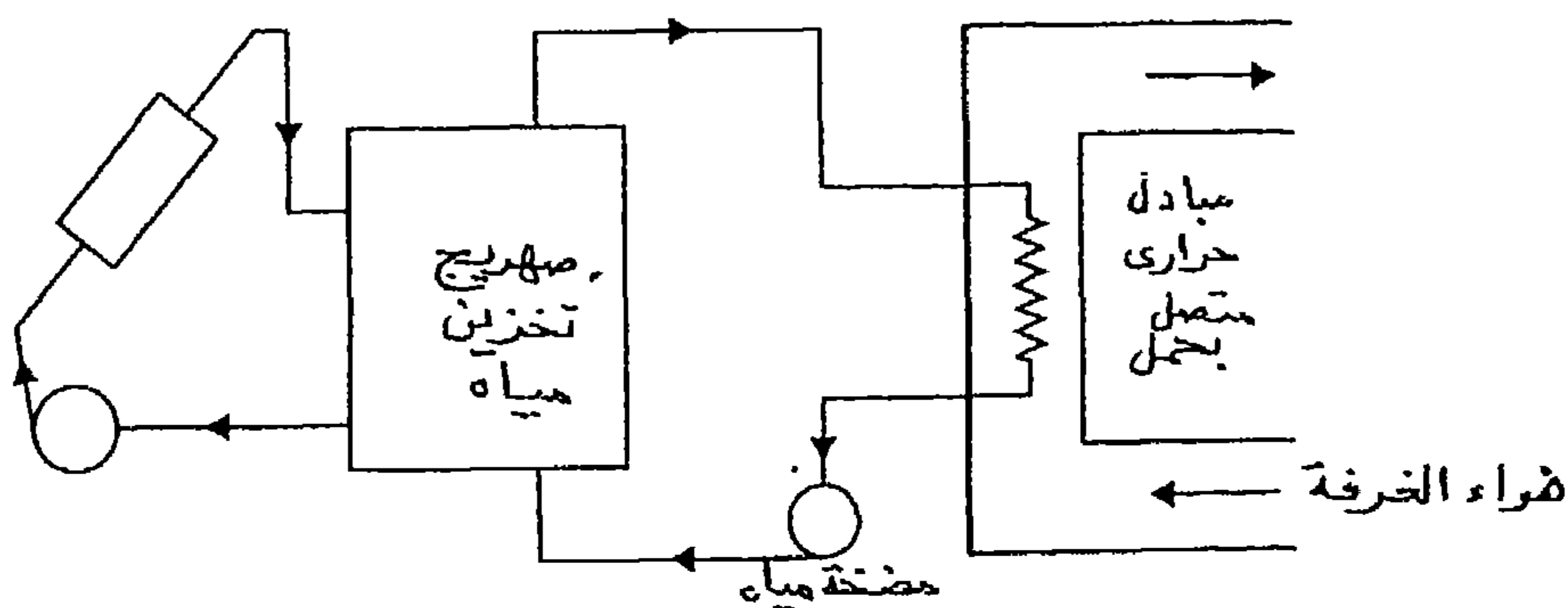
(\*) الحرارة المحسوسة sensible heat هى تلك التى يصحب انتقالها تغير فى درجة الحرارة، وذلك بخلاف الحرارة الكامنة latent heat التى تنتقل ودرجة الحرارة ثابتة (المترجم)



الاقتصادى للموازنة بين الطاقة الشمسية ومصادر الطاقة المساعدة، والحيز المتاح وغيره من المتطلبات لسعة تخزينية بعينها يعتمد فى الأساس على الخواص الفيزيائية والكيميائية للمادة الوسيطة المستخدمة.

### تخزين المياه:

فى تطبيقات الطاقة الشمسية يشيع استخدام الماء كوسيط لتخزين الحرارة المحسوسة نظراً لتكلفته القليلة ولارتفاع حرارته النوعية، واستخدام الماء كوسيط مسخن سهل ومريح أيضاً عند استعماله كوسيط ناقل للمادة وللحرارة فى المجمعات الشمسية وفى المبادلات الحرارية (ذات الحمل)، ونظام تسخين الأماكن بالطاقة الشمسية، حيث يستخدم الماء كوسيط مخزن وناقل، مبين تخطيطاً بشكل (٥-١).



شكل (٥-١)

منظومة تسخين الأماكن بالطاقة الشمسية

## تراتب الطبقات عند تخزين المياه stratification:

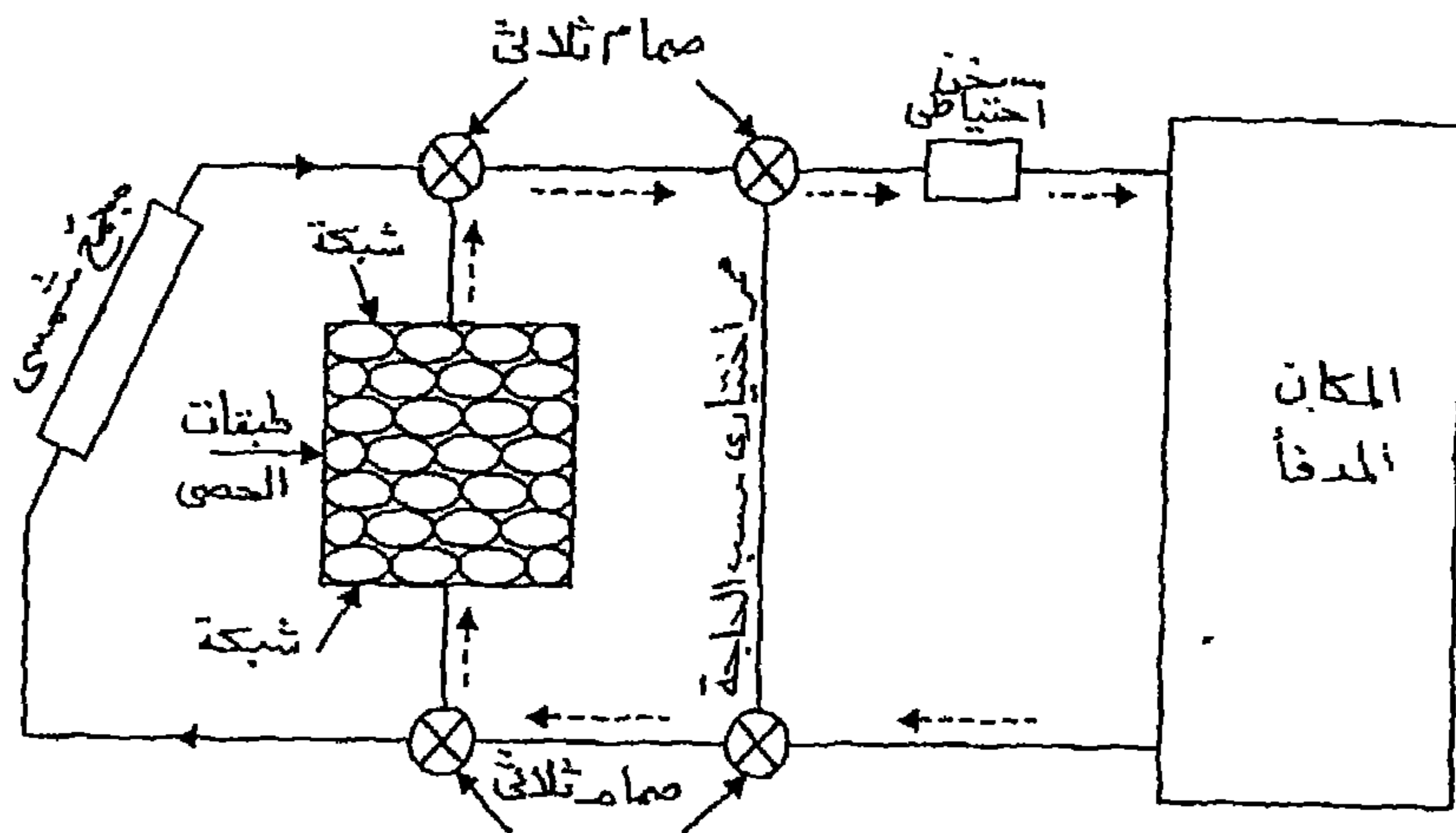
عند دخول الماء الساخن وخروجه من أعلى مستودع التخزين، ولدى سريان الماء البارد دخولا وخروجا بالقرب من قاعه، فمن المحتمل أن يتراتب الماء فى طبقات بالمستودع بتأثير الاختلاف فى الكثافة، وفى مستودع مياه تام التراتب تنخفض درجة الحرارة باطراد من قمة المستودع إلى قاعه، وبوجود الماء البارد بفاح المستودع يمكن الاحتفاظ بدرجة حرارة الماء الداخلى إلى المجمع عند الحد الأدنى، وبذلك يتحسن أداء المجمع من خلال التقليل من الفاقد الحرارى بتيارات الحمل من صفيحة المجمع، وفى ذات الوقت، يمكن أن يلبي الماء ذو أقصى درجات الحرارة بالقرب من قمة صهريج، الاحتياجات لأغراض التسخين بصورة أكثر فاعلية، ومن هنا فإن درجة التراتب الحرارى، والتي تقاس بفرق درجات الحرارة بين قمة الصهريج وقاعه، عامل جوهري فى فاعلية أداء منظومة الطاقة الشمسية.

ويصعب الاحتفاظ بهذا التراتب الحرارى المرغوب، نظرا للحركة الامتزاجية التى يسببها ضخ المياه إلى المجمع وإلى المبادل الحرارى (الحمل)، بالإضافة إلى التأثير الخلطى بسبب تيارات الحمل الطبيعية التى تحدث داخل خزان المياه، ولهذا السبب - وبصفة خاصة مع وحدات التسخين الصغيرة - ليس من الحكمة التعويل على عامل التراتب المرغوب هذا فى صهاريج تخزين السوائل، وغالبا ما تظهر الحاجة للتنبؤ بدرجة التراتب الحرارى فى صهاريج تخزين السوائل عند تصميم منظومات الطاقة الشمسية الضخمة على النطاق التجارى.

## التخزين فى الأحواض ذات الطبقات:

فى منظومات التسخين المعتمدة على الهواء، غالبًا ما تستعمل الأحواض ذات الطبقات كوحدة تخزين للطاقة. والحوض ذو الطبقات هو وعاء ضخم معزول ممتلئ بحصوات متراسة (دون تلامس) يبلغ قطر كل منها بضعة سنتيمترات، ويؤدى دوران الهواء خلال الفجوات بين هذه الحصوات بالحوض إلى تولد تيارات حمل طبيعية وصناعية بين الهواء والصخور، ويوضح شكل (٥ - ٢)، رسماً تخطيطياً لوحدة تخزين بالحوض ذى الحصى، وأساليب تشغيله فى منظومة لتسخين الأماكن عن طريق الهواء.

وفى حالة سطوع الشمس، مع عدم الحاجة إلى تدفئة أية أماكن، يسرى الهواء الساخن من المجمع إلى قمة وحدة التخزين ليسخن محتويات حوض الحصى، وفيما يسرى الهواء إلى أسفل تنتقل الحرارة من الهواء للحصوات، مما يؤدى إلى توزيع تراتبى لدرجات الحرارة فى حوض الحصى، فتكون أعلاها عند القمة وأدناها لدى القاع، ويعود الهواء البارد بعدئذ إلى المجمع ليعاد تسخينه، وهذا هو وضع التخزين للوحدة، وفى حالة عدم إمكانية تجميع الطاقة الشمسية، مع وجود احتياج للتسخين، يسحب الهواء الساخن من قمة حوض الحصى إلى المكان المراد تدفئته، والذى يسحب منه الهواء البارد ويعاد إلى أسفل الحوض، وبذا يفرغ الحوض مخزونه من الطاقة، وهذا هو وضع التفريغ للوحدة، ومما هو جدير بالملاحظة أن عمليتى الشحن والتفريغ من وحدة التخزين ذات حوض الحصى لا يمكن إجراؤهما فى ذات الوقت.



شكل (٥ - ٢)

وحدة تخزين طاقة في الحوض ذي الحصى في منظومة  
تسخين بالطاقة الشمسية عن طريق الهواء (تبين الأسهم ذات الخطوط  
المتصلة اتجاه الهواء في حالة التشغيل (تخزين الطاقة) بينما تبين  
الأسهم ذات الخطوط المنقطعة اتجاهه في وضع تفريغ الطاقة

وهناك وضع تشغيلي ثالث للمنظومة وكما هو مبين بشكل (٥ - ٢) عند سطوع الشمس، وتواجد حمل حراري في نفس الوقت، فهنا يوجه الهواء الساخن من المجمع رأساً إلى المكان المراد تدفئته، كما يوجه الهواء البارد من المكان مباشرة للمجمع، بحيث لا يعبر أي منهما خلال وحدة التخزين، وبالإمكان استخدام وحدة التسخين الاحتياطية لمعالجة نقص الطاقة في المجمع أو الخزان لمواجهة الأحمال المطلوبة، وفي خلال مسار الهواء الذي لا يمر فيه على وحدة التخزين، يمكن الاعتماد على المسخن المساعد الاحتياطي فقط لتلبية كل الاحتياجات من الطاقة، وعلى خلاف صهريج تسخين المياه يمكن بسهولة المحافظة على تراتب درجات الحرارة في حوض الحصى، وهي ميزة ينبغي الانتباه لها واستغلالها عند تصميم المنظومات الشمسية.

## التخزين عن طريق التحولات الطورية:

عندما تتعرض مادة ما إلى تحول طورى بين الصورة الصلبة والصورة السائلة، مع تغير طفيف في الحجم، فعادة ما يصاحب ذلك انطلاق مقدار كبير من الحرارة الكامنة، ويمكن تخزين طاقة التحول هذه ثم استخدامها في تطبيقات استغلال الطاقة الشمسية. شريطة تحقق الاعتبارات الآتية:

(١) ينبغي أن يكون التحول الطورى عند درجة حرارة متلائمة مع متطلبات حمل التسخين أو التبريد.

(٢) يجب أن تكون العملية قابلة للانعكاس reversible عبر عدد كبير من الدورات، من غير ما انخفاض في كفاءة الأداء.

(٣) ينبغي أن يتوفر في المادة المستخدمة الأمان ورخص السعر.

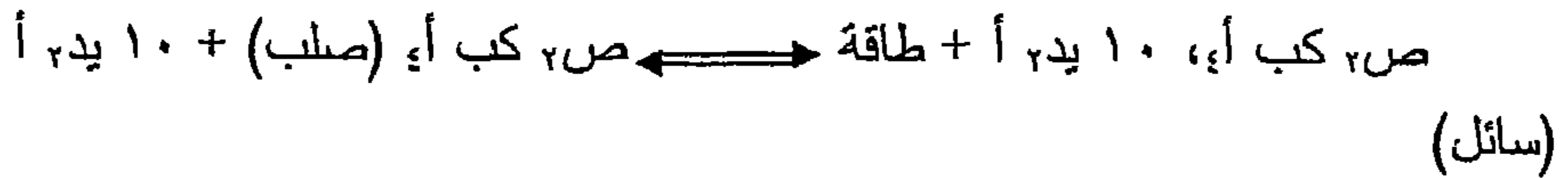
وتستعمل بعض هيدرات الأملاح كوسيط للتخزين في عمليات التحول الطورى، فلهذه الأملاح الخواص التى تناسب ذلك، ويبين جدول (٥-١) خواص مجموعة من هيدرات الأملاح المتلائمة لتخزين الطاقة الشمسية.

جدول (٥-١)

خواص بعض الأملاح المائية (المتميعة)

اسم المادة ورمزها الكيميائي	درجة حرارة التحول الطوري	حرارة الانصهار لوحدة الكتلة	حرارة الانصهار (*) حجمًا
ديكاهيدرات كبريتات الصوديوم (ص ٢ كـ أ، ١٠ يد ٢ أ)	٣٢ م°	٢٥١ كيلو جول / كجم	٣٧٣٠٠٠ كيلو جول / م ٣
نوديكاهيدرات ثنائي فوسفات الصوديوم (ص ٢ يد ٢ أ، ١٢ يد ٢ أ)	٣٦ م°	٢٦٥ كيلو جول / كجم	٤٠٢٠٠٠ كيلو جول / م ٣
بنتايدرات ثيو كبريتات الصوديوم (ص ٢ كـ ٢، ٣، ٥ يد ٢ أ)	٥٠ م°	٢٠٩ كيلو جول / كجم	٣٤٦٠٠٠ كيلو جول / م ٣

وتصلح ديكاهيدرات كبريتات الصوديوم لمتطلبات تخزين الطاقة لتدفئة الأماكن، وهي تتحلل وفقا للمعادلة:



وتصل طاقة التحلل إلى ٢٥٠ كيلو جول / كجم، وتعتمد الطاقة المختزنة الكلية على مدى درجات الحرارة التي يسخن الملح إلى ما فوقها للحصول على

(\*) الأرقام كما وردت بالأصل (المترجم)

تأثيرات الحرارة المحسوسة لكل من بلورات الملح والمحلول، وتتطلق الطاقة عندما تتبلر كبريتات الصوديوم (ص ٢ ك ب أ،) في الماء، مكونة ديكاهيدرات كبريتات الصوديوم (ص ٢ ك ب أ،، ١٠ يد أ).

وتكمن المشكلة في استعمال الأملاح المائية لتخزين الطاقة الشمسية في فرط التبريد super cooling وانفصال الأطوار phase separation، وظاهرة فرط التبريد تحدث عندما تبرد مادة في حالة سائلة إلى ما دون درجة تجمدها دون أن تتبلر، فإذا ما حدث لمحلول ملحي فرط تبريد (من ١٠ إلى ١٥ م) فإن استعادة الحرارة الكامنة المختزنة يكون عند درجة حرارة أقل بكثير من تلك اللازمة لأغراض التدفئة، ويمكن استعمال البوراكس (ص ٢ ب أ،، ١٠ يد أ) مع ديكاهيدرات كبريتات الصوديوم كنواة للبلورة من أجل التقليل من ظاهرة فرط التبريد.

ودرجة انصهار ديكاهيدرات كبريتات الصوديوم غير ملائمة، إذ أنها بتسخينها إلى ما بعد درجة التحول الطوري تتفصل إلى كبريتات صوديوم في حالة صلبة ومحلول مائي من نفس المادة، وحيث إن الملح الذي لا يحتوى على مياه ذو كثافة أعلى من كثافة المحلول فإن هذا الانفصال الطوري يحدث في وعاء التخزين، وعند انطلاق الحرارة لا يكون الطوران ممترجين بما فيه الكفاية كي يتم التحول المعاكس، مما يفضي إلى تدهور الأداء بسبب عدم اكتمال التبلر، ويمكن التغلب على مشكلة الانفصال الطوري بسهولة باستعمال مادة هلامية gel أو بالحد من ارتفاع الوعاء الرأسى.

مثال: استعملت ديكاهيدرات الصوديوم كمادة وسيطة لتخزين الطاقة عن طريق التحول الطوري في منظومة للتسخين الشمسى، فإذا سخن الملح من ٢٥° إلى ٥٠° م، ما مقدار الطاقة المختزنة لكل وحدة كتلة من الملح، علماً بأن الحرارة النوعية لبلورات الديكاهيدرات = ١,٩٥ كيلو جول / كجم. كلفن، ٣,٥٥ كيلو جول / كجم. كلفن لمحلول الملح اللامائى؟

**الحل:** الوحدة المخزنة لكل وحدة كتلة =  $n \text{ ص} (d - ١) + ح ك + n \text{ ص} (d - ٢)$   
حيث:  $n \text{ ص} =$  الحرارة النوعية للملح في الحالة الصلبة =  $١,٩٥$  كيلو جول / كجم.°ك.

$n \text{ ص} =$  الحرارة النوعية للملح في الحالة السائلة =  $٣,٥٥$  كيلو جول / كجم.°ك.

$ح ك =$  الحرارة الكامنة للتحويل الطوري =  $٢٥٠$  كيلو جول / كجم.

$d =$  درجة حرارة الانصهار =  $٣٢$ °م.

$d ١ =$  درجة الحرارة الابتدائية للسائل =  $٢٥$ °م.

$d ٢ =$  درجة حرارة السائل النهائية =  $٥٠$ °م.

فتكون كمية الحرارة المخزنة لكل كيلو جرام من ديكاهيدرات كبريتات الصوديوم:

$$١,٩٥ (٣٢ - ٢٥) + ٢٥٠ + ٣,٥٥ (٥٠ - ٣٢) = ٣٢٨ \text{ كيلو جول.}$$

### الحوض الشمسي:

تتوفر الطاقة الشمسية - كمصدر متجدد ومتاح بوفرة في كل أجزاء العالم، وتتركز ميزتها الحقيقية هذه في الأوقات التي يعاني فيها العالم من نقص الطاقة، غير أن تسخير الطاقة الشمسية على نطاق واسع تواجهه صعوبتان جوهريتان، تتبعان من خاصيتي الإشعاع الشمسي الأساسيتين، وهما:

١ - انخفاض كثافة الطاقة.

٢ - التفاوت الكبير فيها.



فانخفاض كثافة الطاقة يعنى أن مساحة المجمع اللازم لتجميع طاقة شمسية تكافئ ما يعطيه برميل نبط يومياً، وبكفاءة متوسطها ٥٠% للمجمع، تصل إلى ٢٠٥م٢، ومثل منظومة التجميع هذه تتكافئ استثمارات باهظة من مصادر متعددة، والمشكلات الأخرى الناجمة عن كبر مساحة المجمع تتضمن:

١ - نقل الطاقة المجمعة من مواقع مختلفة إلى نقطة استغلال مركزية واحدة، وهو ما يفضى ليس إلى ارتفاع التكاليف فحسب، بل إلى انخفاض كفاءة استغلال الطاقة، بسبب الفاقد الحرارى.

٢ - ضرورة الحفاظ على نظافة هذه المنظومة الضخمة بحيث يستفاد بأكبر مقدار ممكن من الطاقة.

فإذا ما جمعنا ما بين تجميع الطاقة الشمسية وتخزينها، وبالتقليل من الاعتماد المكثف على مواد الإنشاءات المدنية وأساليبيها، فإن (مستودعات) الطاقة الشمسية تقدم الحل للعديد من المشاكل، والمستودع الشمسى هو (بحيرة) صناعية مبنية، ترتفع فيها درجة الحرارة بدرجة محسوسة فى مناطقها السفلية عن طريق منع تيارات الحمل، وغالباً ما يطلق عليها تعبير أكثر تحديداً هو "المستودعات الشمسية ذات الملوحة المتدرجة" أو "المستودعات الشمسية بدون تيارات حمل". وتبدو الميزة الاقتصادية للمستودعات الشمسية مع الاستخدامات ذات المساحات الشاسعة، ومن المرجح أن ينتشر استعمالها مستقبلاً متى حلت المشكلات المتعلقة بتشغيلها وصيانتها.

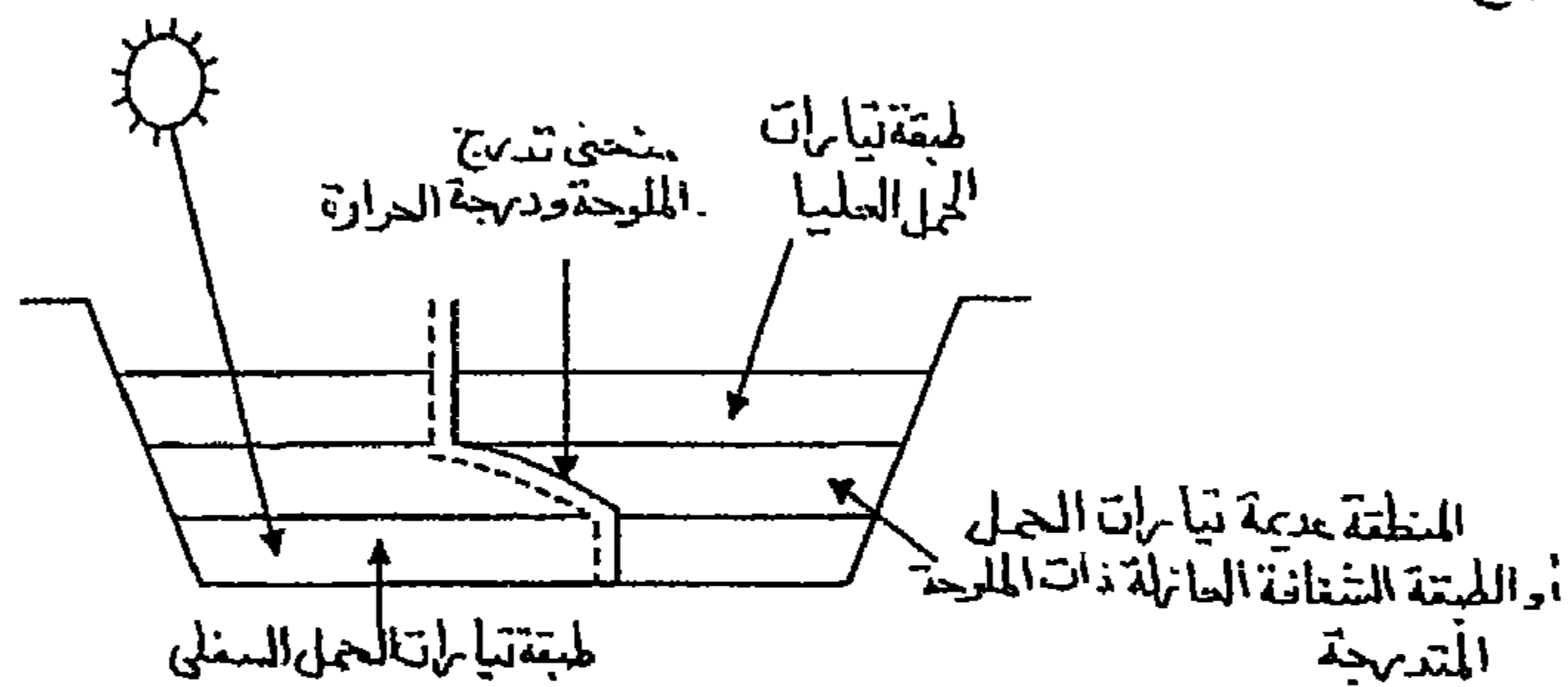
### أساس عمل (المستودع الشمسى):

مما هو معروف جيداً أن كثافة الموائع (كالماء والهواء)، تنخفض بالتسخين، فتطفو لأعلى، وفى بركة أو بحيرة طبيعية، يسخن الماء بفعل أشعة الشمس، ويرتفع الماء الساخن من داخل البركة وأصلاً للسطح، ويفقد حرارته للجو.. والنتيجة المحصلة لذلك هو بقاء درجة حرارة ماء البركة مساوية - تقريباً -

لدرجة حرارة الجو، أما المستودع الشمسي فيبطل هذه الظاهرة بإذابة الملح بالطبقات السفلى من البركة بحيث يتسبب ثقلها في عدم الارتفاع لأعلى (حتى مع ارتفاع درجة حرارتها)، وبالتالي في عدم برودتها.

وبالبحيرة الشمسية ثلاث مناطق (شكل ٥ - ٣)، فالمنطقة العليا (منطقة السطح أو منطقة تيارات الحمل)، لها درجة حرارة الجو ونسبة ملوحة قليلة، في حين أن المنطقة السفلية ساخنة للغاية (١٠ - ٨٠ م) وذات ملوحة عالية جداً، وهي الطبقة التي تجمع الطاقة الشمسية وتخزنها في صورة حرارية، وعلى ذلك يطلق عليها منطقة التخزين أو المنطقة منخفضة تيارات الحمل، ويفصل بين الطبقتين طبقة مهمة هي طبقة التدرج أو الطبقة عديمة تيارات الحمل، وفيها ترتفع نسبة الملح بالاتجاه نحو الأسفل، مولدة نوعاً من منحدر في الملوحة أو في الكثافة، فإذا ما اعتبرنا طبقة بعينها في هذه المنطقة، فإن الماء فيها ليس بمقدوره أن يرتفع لأعلى، إذ أن الماء الذي يعطوه أقل ملوحة، وبالتالي أقل كثافة.

وبالمثل لا يستطيع ماء هذه الطبقة الهبوط لأسفل لأن الماء أسفله أعلى ملوحة وبالتبعية أكبر كثافة، فهذه الطبقة الثابتة ذات الملوحة المتدرجة تعمل عمل عازل شفاف، يسمح لضوء الشمس أن يبلغ منطقة القاع ويبقى محتبساً هناك، وتستخلص الطاقة المفيدة من المستودع الشمسي في صورة الماء المالح الساخن الذي يستخرج من منطقة التخزين.



شكل (٥ - ٣)

رسم تخطيطي للمستودع الشمسي

وعادة ما تكون المنطقة العليا حيث تيارات الحمل، ذات سمك قليل (نحو ١٠ - ٢٠ سم) والمنطقة عديمة تيارات الحمل سمك أكبر، بحيث تحتل أكثر من نصف عمق البحيرة، وتضارع المنطقة السفلى ذات تيارات الحمل في سمكها، المنطقة التى ليس بها تيارات حمل، والمستودع الشمسى النمطى ذو عمق ١ - ٢ م ويبطن قاعه بمادة بلاستيكية شديدة التحمل، وتذاب فى الماء الأملاح من نوعيات كلوريد المغنسيوم وكلوريد الصوديوم، ونترات الصوديوم.

### مشروع المستودع الشمسى (بوج Bhuj):

مشروع المستودع الشمسى "بوج" هو مشروع تطوير وبحث، وقد تمت إقامته فى إطار برنامج قومى للمستودعات الشمسية، وهو مشروع استحدثته ونهضت به مجموعة من العلماء عام ١٩٨٣ تحت قيادة الدكتور الراحل ك. س. راو، ومن بعده مدير "وكالة جوجارات لتطوير استغلال الطاقة"، وقد صدر به قرار رسمى عن وزارة مصادر الطاقة غير التقليدية بالحكومة الهندية عام ١٩٨٧، ويصل ما رصد له إلى مبلغ ٨,٧٣ مليون روبية هندية.

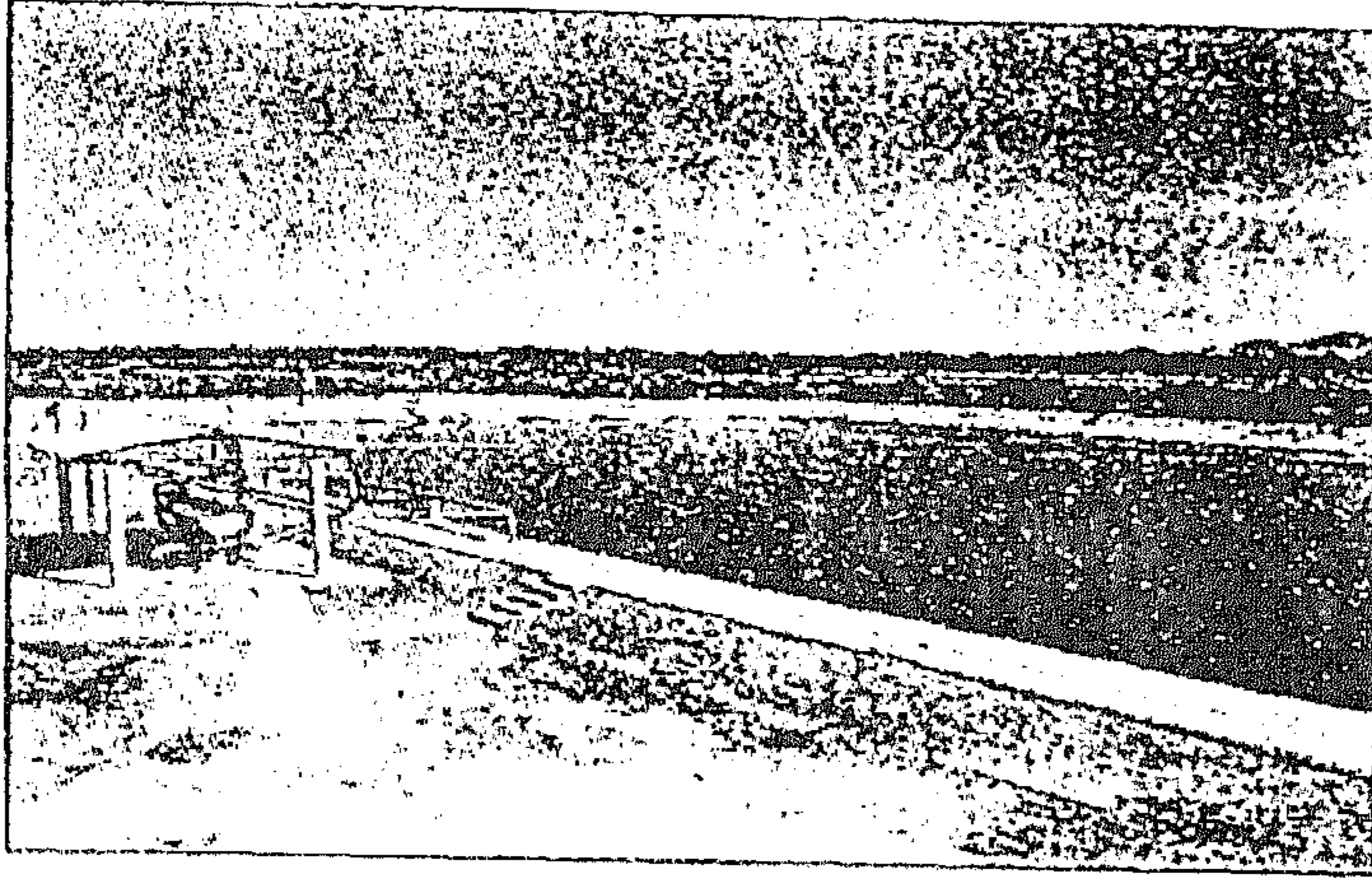
وهو مشروع تعاونى بين وكالة "جوجارات" ببارودا، ومعهد تاتا لبحوث الطاقة بنيودلهى، وهيئة جوجارات لتنمية صناعة الألبان بجاند هيناجار، وقد تكفلت (تاتا) بكل النواحي الفنية، بخلاف التنفيذ الكامل للمشروع، والمستودع الشمسى المقام على مساحة ٦٠٠٠ م<sup>٢</sup> فى بنايات مصنع ألبان كوتش يمدّه بنجاح بالحرارة اللازمة لعمليات المصنع منذ أوائل سبتمبر ١٩٩٣، وهو الآن أكبر مستودع شمسى يجرى تشغيله فى العالم.

## مكونات المشروع:

تبلغ أبعاد الحوض الشمسي مائة متر طولاً وستين متراً عرضاً ويبلغ عمقه ٣,٥ م، وبجانبه أحواض تبخير (لإعادة تدوير الملح)، وحوض شمسي تجريبي بمساحة ٢٢٥م<sup>٢</sup>، كما تم بالمثل بناء حوض لمزج الأملاح، ولمنع رشح الماء المالح وتسربه، اتبع أسلوب خاص لتبطينه يتضمن استعمال المواد المتاحة محلياً في ذلك، وتتكون مادة التبططين من طبقات مدمجة جيداً من الطفل الصيني والبوايثلين، وبعد تبطينه ملئ الحوض بالماء وأذيب به ٤٠٠٠ طن من الملح المعتاد، لتكوين محلول ملحي كثيف، وتم تخليق منحدر للملوحة المتدرجة بعد ذلك، كما أقيمت شبكات لصد الأمواج ومنصة خاصة للحصول على عينات وممرات ينساب خلالها تيار المحلول الملحي الساخن المسحوب، وأخرى يطرد خلالها، وما إلى ذلك... وقد بدأ استخلاص الحرارة من المشروع بعد تركيب المبادلات الحرارية.

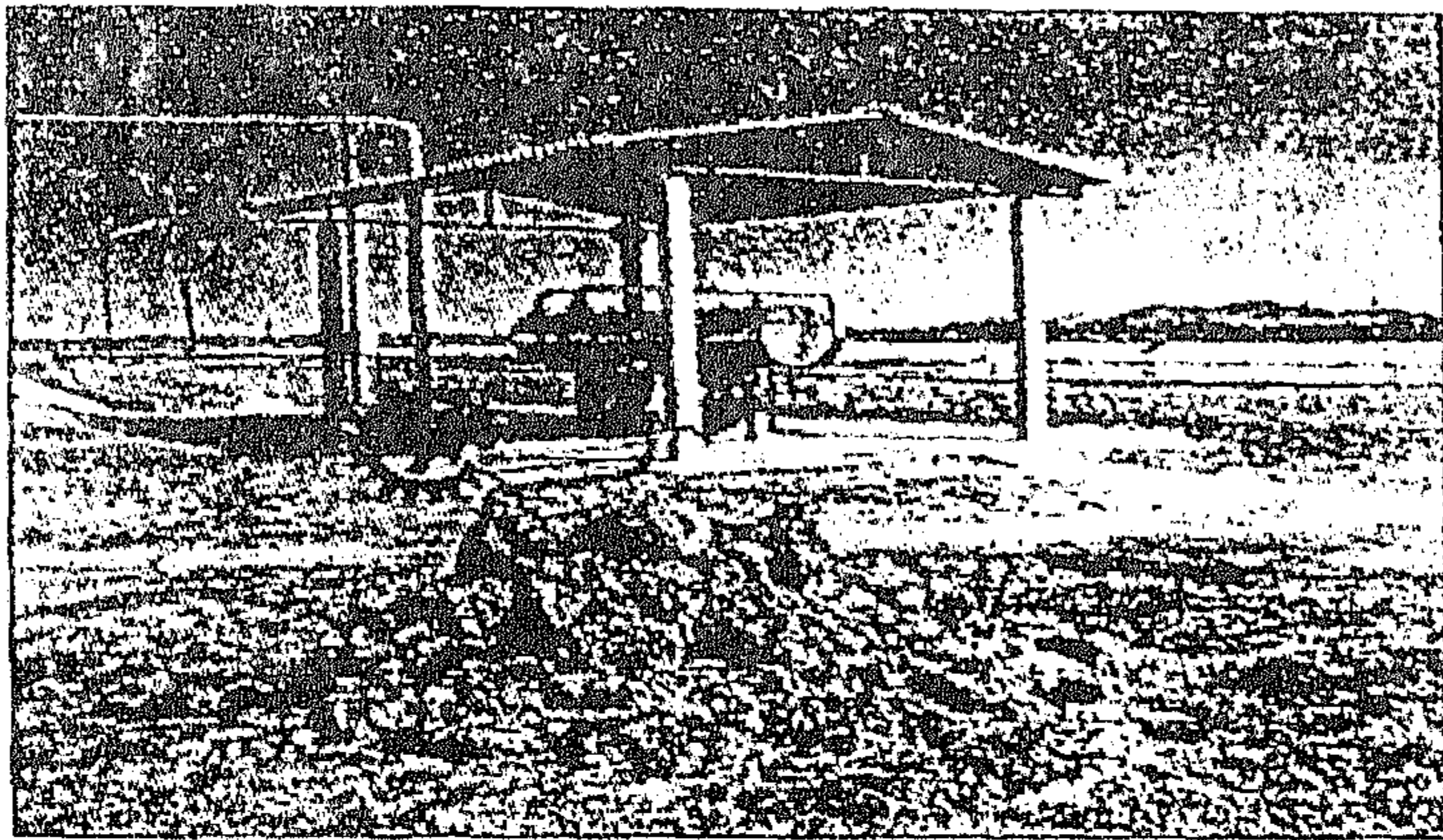
## تزويد العمليات الصناعية بالحرارة:

يستعمل حوض بوج الشمسي في الوقت الراهن في تزويد معمل ألبان كوتش بالحرارة، ولإنجاز ذلك أقيم مبادل حراري من نوع الصفائح والأنابيب shell & tube، حيث يدور المحلول الملحي الساخن المستخلص من باطن الحوض، مسخناً للمياه، ويغذى الماء الساخن بدوره في المرجل boiler إلى جانب استخدامه في عمليات التنظيف والغسل، ويصل حجم المياه المتدفقة يومياً - في درجة حرارة ٧٠° - إلى ٨٠٠٠٠ لتر، وبهذا فالمشروع هو أول مشروع بالبلاذ يوضح فائدة تطبيق تقنية الأحواض الشمسية لتزويد العمليات الصناعية بالحرارة اللازمة لها.



شكل (٥ - ٤)

حوض بوج الشمسي (٢٦٠٠٠ م<sup>٢</sup>)



شكل (٥ - ٥)

المبادل الحراري للحوض الشمسي

## استعمالات الأحواض الشمسية:

تتعدد الاستخدامات للطاقة المجمعة بواسطة الأحواض الشمسية.

## إمداد العمليات الصناعية بالحرارة:

بخلاف التزويد بالماء الساخن، يمكن استعمال الأحواض الشمسية للحصول على الهواء الساخن اللازم للصناعة أو في التدفئة، كما يمكن استخدامه في تجفيف المحاصيل الزراعية والأسماك والمواد الكيميائية، بالإضافة إلى معالجة الأخشاب الموسمية، ويمكن تجفيف العديد من الكيماويات غير العضوية ومواد الصباغة وغيرها عند درجات أدنى من ٨٠°م، وهى ما يمكن الوصول إليها بسهولة فى الأحواض الشمسية.

## تحلية المياه:

من أهم التطبيقات النافعة للأحواض الشمسية، استعمالها للحصول على مياه الشرب التى تجابه الكثير من المدن والقرى بالهند نقصا حادًا فيها، ويقع العديد من هذه القرى على امتداد المناطق الساحلية، أو فى مواقع يمكن الحصول فيها على زيت الملح (\*) bittern بأسعار زهيدة، بالإضافة إلى ذلك فهناك ندرة فى ماء الشرب اللازم للعاملين فى أغلب مصانع الملح، والأحواض الشمسية التى تعمل على أساس منظومة تحلية المياه تقدم حلاً اقتصاديًا للحصول على المياه العذبة من الماء قليل الملح أو من مياه البحر، وتضم المنظومة الكاملة: الحوض الشمسى، ووحدة تقطير مياه متعددة المراحل بالتبخير عند درجة حرارة منخفضة، ومبادلاً حراريًا ومكثفًا، ومجموعة مضخات إلى آخره.

---

(\*) زيت الملح bittern هو المحلول المر من أملاح البروميد والمغنسيوم والكالسيوم المتخلف بعد تبلور كلوريد الصوديوم من مياه البحر (المترجم)

## التجميد:

منظومات التبريد عن طريق امتصاص البخار، ملائمة للاستعمال مع الأحواض الشمسية، والتأثير التبريدي الناتج عنها يمكن استعماله في تبريد الألبان، وتخزين اللبن ومنتجاته والتخزين البارد عموماً وفي تكييف الهواء.

وتحتوى المنظومة الكاملة على جهاز تبريد عن طريق امتصاص البخار ومضخات ومبادلات حرارية وما إلى ذلك، إلى جانب الحوض الشمسي.

## توليد القوى المحركة:

يمكن استخدام الطاقة الحرارية المخزنة في الحوض الشمسي بالمثل في توليد القوى الكهربائية باستعمال آلة تعمل على أساس دورة رانكين العضوية<sup>(\*)</sup>، وتتكون المنظومة المتكاملة من مصدر للبخار، وتوربين ومكثف ومضخات ونظم مناوبة alternators وخلافه، إلى جانب الحوض الشمسي.

## اقتصاديات الحوض الشمسي:

لقد جرت مقارنة التكاليف السنوية المكافئة لتطبيق نظام الحوض الشمسي في مختلف التطبيقات بتكاليف التقنيات التقليدية وكما يبينها الجدول (٥ - ٢)، اعتماداً على الخبرة المكتسبة من تشغيل حوض (بوج) الشمسي، ويظهر من الجدول كيف يبدو الحوض الشمسي بديلاً تصالح مقارنته بغيره، علماً بأن انتشار استخدام الأحواض الشمسية كفيل بتقليص تكلفتها الأولية بنسبة محسوسة، وبدعم حكومي في شكل حوافز (كاعتبار نسبة الإهلاك ١٠٠%) من الممكن أن تصبح الأحواض الشمسية أكثر بدائل استغلال الطاقة الشمسية قابلية للتطبيق في العديد من المواقع.

---

(\*) دورة رانكين Rankine cycle هي دورة ثرموديناميكية مغلقة تتحول فيها الحرارة إلى شغل ميكانيكي ويكون المائع المستخدم فيها عادة هو الماء، أما في دورة رانكين العضوية فيستعمل مائع ذو وزن جزيئي كبير بما يسمح باستقاذ الحرارة من النفايات (المترجم)

جدول (٥ - ٢)

التكاليف السنوية المكافئة لمختلف التطبيقات المستعملة للأحواض الشمسية

مجال الاستخدام	الطرق التقليدية	الحوض الشمسي	النظم الشمسية الأخرى
التسخين في العمليات الصناعية: روبية / كيلو وات ساعة	٠,٥٦ (أ)	٠,٣٤	٠,٧٠ (ب)
تحتية المياه: روبية / م <sup>٣</sup>	٧٥ (جـ)	٧٦	٣٥٠ (د)
التبريد: روبية / كيلو وات ساعة	٠,٨٨	٠,٩٢	—

ملحوظات جدول (٥ - ٢):

(أ) بإحراق القمح.

(ب) باستخدام مجمعات الطاقة الشمسية الصفيحية.

(ج) باستخدام تقنية الغشاء membrane.

(د) أجهزة تقطير السوائل بالطاقة الشمسية.

تشغيل وصيانة بطاريات (حاشدات) التخزين المستعملة في المنظومات الكهروضوئية:

بطاريات الرصاص الحامضية هي اليوم أكثر الأنواع شيوعًا كوسيط للتخزين في التطبيقات الكهروضوئية، ويتميز هذا النوع من البطاريات بكفاءتها التشغيلية العالية (تتراوح عادة ما بين ٧٠، ٨٠%) وتكاليفها المنخفضة نسبيًا ومعدل تفريغها الذاتي المنخفض (إذا ما خلت من عنصر الأنثيمون)، وتشمل



عيوبها انخفاض تيارى الشحن والتفريغ المسموح بهما، وقلة عدد المرات المسموح بها للتفريغ العميق<sup>(\*)</sup>، وسنبحث الآن تشغيل وصيانة البطاريات التى تستعمل فى المنظومات الكهروضوئية، وكذلك تأثير إضافة حمض الفسفوريك لتقليل عملية التفريغ الذاتى للحد الأدنى.

### تركيب البطارية والتفاعلات الكيميائية بها:

تتكون كل خلية بالبطارية من عدد من الصفائح ذات شحنات موجبة وسالبة، وتفصل هذه الصفائح عن بعضها بحواجز من مادة مسامية غير موصلة للكهرباء كالبلستيك أو الخشب أو المطاط، ويستعمل - كمحلول كهربائى - حمض الكبريتيك المخفف والماء، وتمنع الحواجز الأقطاب من التلامس مع بعضها وإن كان محلول التحليل الكهربائى يتخللها ويتسرب خلالها.

وفى بطاريات الرصاص الحمضية تصنع الشبكات إما من سبيكة الرصاص مع الأنثيمون أو الرصاص مع الكالسيوم، ويكسب الأنثيمون أو الكالسيوم الشبكة قوة أكثر مما يصنع الرصاص النقى، ويؤثر نوع السبيكة المستعملة على عمر البطارية وعلى متطلبات صيانتها، وعندما تتقدم البطارية ذات الشبكة المصنوعة من الرصاص والأنثيمون فى العمر يهجر الأنثيمون الشبكة متجهاً إلى الصفيحة السالبة، وهو ما يغير من كيميائية البطارية ويؤدى إلى تفريغ ذاتى جزئى، ويزيد نسبة تصاعد الغازات خلال عملية الشحن، وعلى ذلك فمع تقدم البطارية فى العمر تزيد قيمة التيار اللازم للمحافظة على مستوى الشحن، كما يتكرر الاحتياج إلى إضافة الماء دورياً.

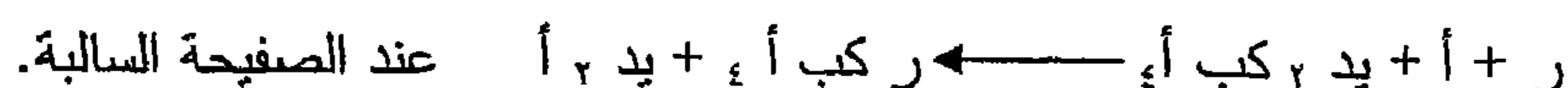
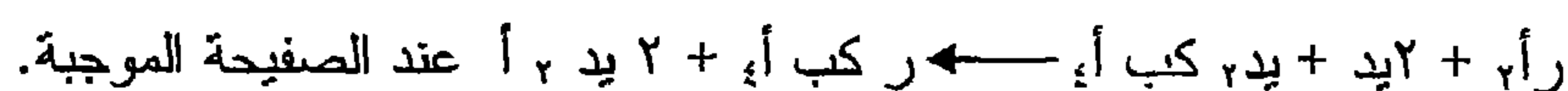
---

(\*) يقصد بالتفريغ العميق deep discharging تفريغ البطارية تفريغاً شبه كامل حتى ٢٠% أو أقل من سعتها (المترجم)

وعند تسليط فرق جهد على صفائح البطارية، يتم تفاعل كيميائي، هو عكس التفاعل الحادث عندما تتخذ البطارية مصدرًا للتيار، وفي خلية تامة الامتلاء تأخذ الصفيحة السالبة شكل الإسفنجة أو الرصاص الطرى ذي اللون الرمادي، في حين تصنع الصفيحة الموجبة ذات اللون البني القائم من بيروكسيد الرصاص.

وعندما ينساب التيار الكهربى من البطارية يتحلل حمض الكبريتيك إلى أيونات هيدروجين وأيونات كبريتات، وعند الصفيحة السالبة تتحد أيونات الكبريتات مع الرصاص الإسفنجى لتكوين كبريتات الرصاص ذات اللون الرمادي الضارب للبياض، ولدى الصفيحة الموجبة يفقد بيروكسيد الرصاص أكسجينه إلى أيون الهيدروجين مكوناً الماء.

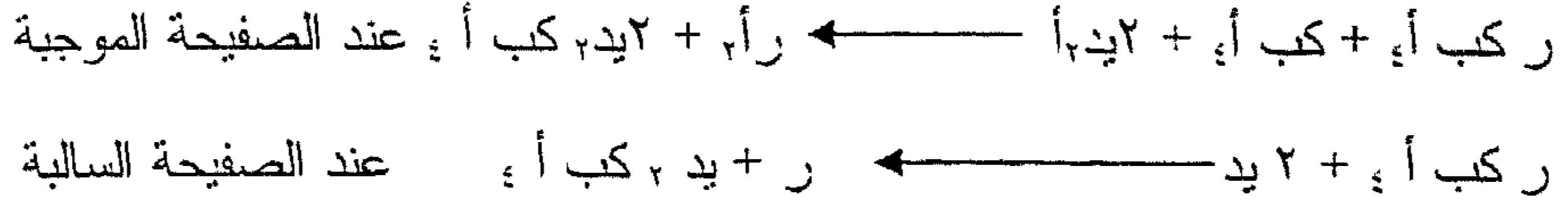
وتتحدد أيونات الرصاص مع أيونات الكبريتات مكونة كبريتات الرصاص، وعلى ذلك فلدى التفريغ، تتبدل الصفائح السالبة والموجبة من رصاص إسفنجى وبيروكسيد رصاص على الترتيب إلى كبريتات رصاص، ويتحول محلول التحليل الكهربى من حمض كبريتيك عالى التركيز إلى تركيز أقل، والتفاعلات تمثلها المعادلات التالية:



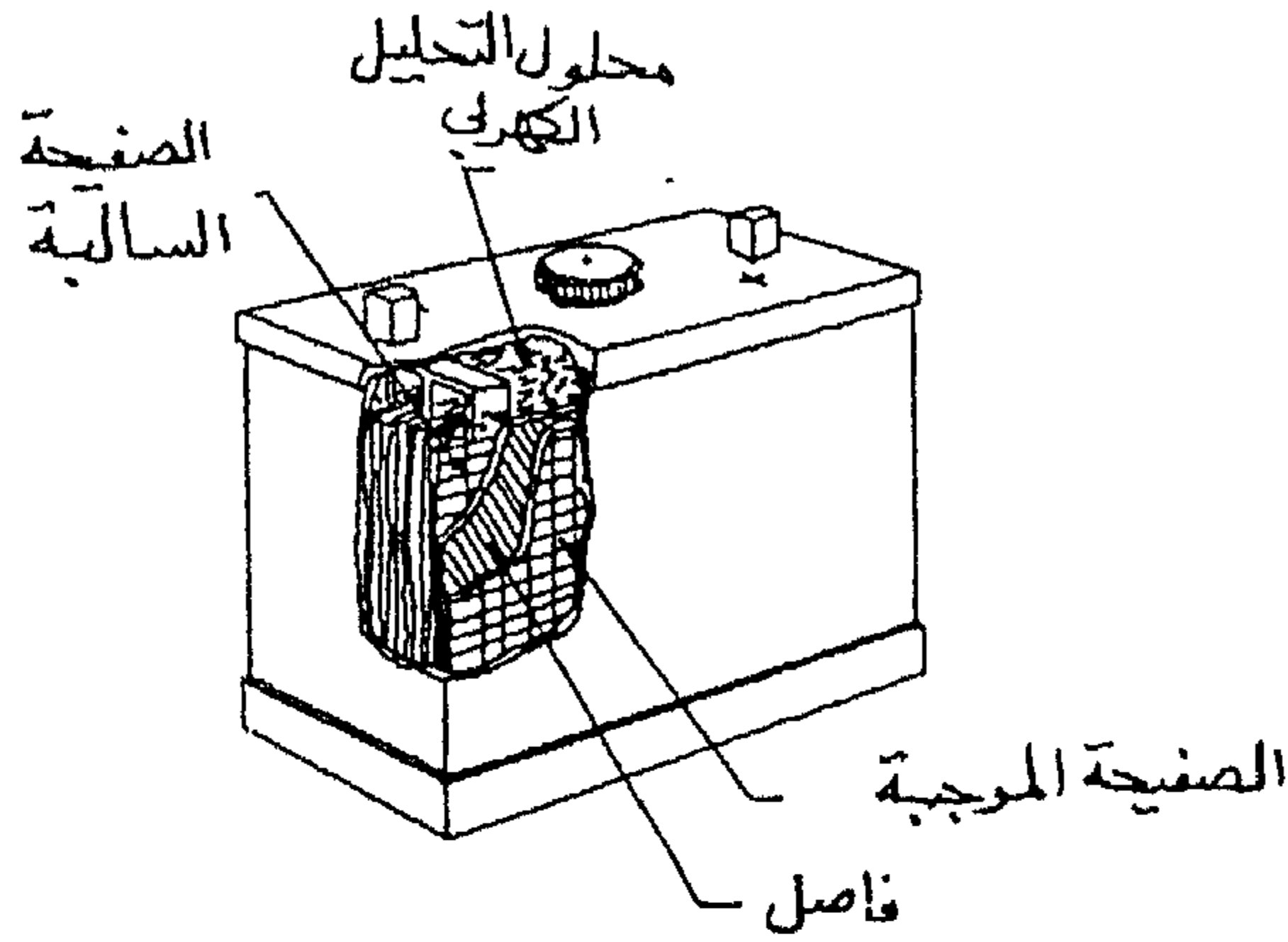
وفي حالة تمام امتلائها، تعطى الخلية انحرافاً فى قراءة الفولتمتر (بمقدار ٢,٢ فولت) فى حين تبين قراءة مقدارها ١,٧٥ فولت فى حالة تمام تفريغها.

ومع إعادة شحن البطارية من جديد، ينعكس التفاعل الكيميائى، فيتحلل جزئ الماء إلى أيونات هيدروجين وأكسجين، وتجذب أيونات الهيدروجين أيونات الكبريتات مكونة حمض الكبريتيك، ومع حدوث هذه العملية تتحول الصفيحة

السالبة إلى رصاص إسفنجي، بينما تتحد الصفيحة الموجبة بالأكسجين لتكوين بيروكسيد الرصاص، وهما التفاعلات اللذان يقعان في عملية الشحن.



وخلال الشحن تتبعث كميات قليلة من الأكسجين والهيدروجين، وتقلت من خلال فتحات أصابع البطارية (شكل ٥ - ٦). وينبغي أن تحفظ البطاريات دائماً في فضاء مفتوح (فالأكسجين والهيدروجين قد يكونان قابليين للانفجار)، والأكسجين والهيدروجين الهاربان من البطارية يأتيان من الماء المتحلل كهربياً، وتقل كمية الماء في المحلول الكهربى، وعلى ذلك فلا بد من إضافة الماء المقطر بصفة دورية لتعويض الماء المفقود في هيئة غازات.



شكل (٥ - ٦)

أجزاء الحاشدة (البطارية)

## عمر البطارية:

عندما تتم البطارية عمل دورات كاملة أى كلما فرغت تمامًا بعد أن كانت تامة الامتلاء، تبدأ فى فقدان القدرة على تحويل كبريتات الرصاص إلى بيروكسيد رصاص أو رصاص إسفنجى، ومن ثم يتصلد جزء من الكبريتات ويصبح قصيفًا هشًا، مما يقلل من سعة البطارية معبرًا عنها بالأمبير، ساعة (وتعرف هذه العملية بالكبرتة أو التشبع بالكبريتات sulphation وهى عملية لا انعكاسية) وبالتدريج تفقد البطارية صلاحيتها للاستعمال.

وعدم شحن البطارية بالكامل، أو الإفراط فى شحنها أكثر من اللازم لهما بالمثل تأثيرهما على عمر البطارية، وإذا ما تركت البطارية لفترة مديدة وهى فى حالة شحن ضعيف (أى فارغة بنسبة ٧٠ أو ٨٠% مثلاً)، تتشبع الصفائح بالكبريتات، ويصعب عندئذ شحنها ثانية، ويحدث الشحن الضعيف أيضًا إذا لم تشحن البطارية على الإطلاق حتى سعتها القصوى، فإذا لم تصل نسبة شحن البطارية أبدًا إلى أكثر من ٨٠% فإنها فى النهاية تفقد ٢٠% من سعتها.

ويؤدى ضعف شحن البطارية إلى تراكم الكبريتات، فى حين يدمر الإفراط فى الشحن الصفائح فيزيائيًا، فإذا كانت البطارية تامة الشحن، فإن أى شحن إضافى يفضى إلى خروج الماء من المحلول الكهربى فى هيئة أكسجين وهيدروجين، وإذا زاد الإفراط فى الشحن الإضافى، فقد تتسبب فقاعات الغاز المتسرب سريعًا إلى خلخلة فى مادة الصفيحة وعدم ثباتها، ومتى شح الماء فى المحلول الكهربى، ارتفع تركيز حمض الكبريتيك، وإذا زاد هذا التركيز عن حد معين، تآكلت الصفيحة كيميائيًا، وللإفراط فى الشحن أيضًا أثره الحرارى الضار، إذ يتسبب فى اعوجاج الصفيحة، والشحن المفرط قليلًا - بمعدل مرة كل شهر مثلاً - قد يقلل من مشكلة تراكم الكبريتات ويعيد تركيز حمض الكبريتيك إلى مستواه المرغوب.

ووزن البطارية عامل مهم في تحديد عمرها المتوقع، كما يحدد الرصاص بها سعتها وعمرها المتوقع.

فعلى سبيل المثال، فإن بطارية وزنها ٥ كجم، معايرة على ٢٢٥ أمبير. ساعة لن تزيد في العمر على بطارية وزنها ١٥ كجم لها نفس المعايرة.

### توصيلات البطارية:

عند توصيل البطاريات على التوالي نحصل على ارتفاع في فرق الجهد المطلوب، في حين يبقى معدل الأمبير. ساعة مساوياً لمعدله لبطارية مفردة، فعلى سبيل المثال إذا وصلت ١٦ بطارية (مواصفات كل منها ٢ فولت، ١٠٠ أمبير ساعة) على التوالي، فإن فرق الجهد الكلي للمجموعة سيكون ٣٢ فولتاً والسعة هي ١٠٠ أمبير ساعة، وتكون سعة التخزين  $= 32 \times \frac{100}{1000} = 3,2$  كيلو وات ساعة.

ولزيادة سعة التخزين، وبعبارة أخرى السعة بالأمبير. ساعة لمجموعة بطاريات مع الحفاظ على نفس الجهد الكهربى، توصل البطاريات على التوازي، والبطاريات الموصلة على التوالي يجب أن يكون لها جميعاً نفس السعة معبراً عنها بالأمبير. ساعة، وعند شحن مجموعة من البطاريات ذات ساعات متفاوتة وهى موصلة على التوالي، لا تشحن البطارية ذات السعة الأقل شحنًا كافيًا، وإذا وصلت بطارية واحدة في وصلة على التوالي في عكس الاتجاه، فإن شحنها ستفرغ، وإذا استمر هذا الوضع كذلك لفترة طويلة فإنها ستبدأ في إعادة الشحن في عكس الاتجاه، وتتحول الصفيحة السالبة إلى بيروكسيد الرصاص والصفيحة الموجبة إلى رصاص إسفنجى، ولا يمد هذا الشحن العكسى في عمر البطارية، والبطاريات الموصلة على التوازي ينبغي أن يكون لها نفس الفرق في الجهد، فإذا ما وصلت بطارية فرق جهدها ٦ فولت على التوازي بأخرى ذات فرق جهد ١٢ فولتاً، فإن فرق الجهد بينهما سيتعادل، وستفرغ البطارية ذات الـ ١٢ فولتاً شحنها في صورة تسخين الأسلاك الواصلة بين البطاريتين.

## قياس مستوى الشحن:

تستخدم عدادات قياس من نوعية الهيدروميتر والفولتميتر والمؤشر الإلكتروني عموماً لقياس مستوى الشحن، ويقاس الهيدروميتر الوزن النوعي للمحلول الكهربائي (الإلكترولايت)، والوزن النوعي لحمض الكبريتيك يساوي ١,٨٤٠، وللماء ١,٠٠٠ والمحلول الإلكتروني بالبطارية مكون من الماء وحامض الكبريتيك، فوزنه النوعي بين ١,٠٠٠، ١,٨٤٠، وفي واقع الحال تصل قيمته إلى ١,٣٠ عند تمام شحن البطارية، ١,١١٠ عند تفريغها تماماً.

وهناك قاعدة عامة تتبع لمعرفة مستوى شحن البطارية، تعتمد على قراءة الهيدروميتر، فكل تغير قدره ٠,٠٣ أى ٣٠ نقطة اعتباراً من الحد الأقصى للوزن النوعي يؤشر لتغير مقداره ٢٥% في مستوى الشحن، فمثلاً يصل الوزن النوعي لبطارية تامة الشحن إلى ١,٣٠ ويهبط إلى ١,٢٧ إذا ما فقدت ٢٥% من شحنها.

وتختلف القراءة القصوى للهيدروميتر لبطارية كاملة الشحن وفقاً لنوع البطارية وتصميمها ومنتجها، ومن الموصى به التأكد من قيمة هذه القراءة القصوى قبل استعمال البطارية، وللبطاريات ذات الدورة العميقة(\*) تتراوح هذه القيمة ما بين ١,٢٧٥، ١,٣٠٠ ولبطاريات سيارات الركوب، تصل لنحو ١,٢٦، وللبطاريات من النوع الطافي(\*\*) أو المثبت لحوالي ١,٢١.

وتسجيل قراءة الفولتميتر يعد أيسر الوسائل في مراقبة مستوى شحن البطاريات، ويشير الفولتميتر إلى قيمة ١,٧٥ فولت للبطارية الفارغة تماماً (إذا ما كانت الخلية خارج الخدمة)، وتقع القراءة - لبطارية تامة الشحن - ما بين ٢,١، ٢,٢ فولت، ويمكن تحديد فولتية كل خلية بإضافة الرقم ٠,٨٤ للوزن النوعي

---

(\*) Deep cycle battery بطاريات مصممة بحيث تفرغ شحناتها بانتظام تفريغاً عميقاً (المترجم)

(\*\*) floating battery بطارية تقام على عوامات لحماية السواحل (المترجم)

لمحلول كل خلية، فإذا كانت قراءة الهيدرومتر ١,٢٠٠ مثلاً فإن فولتية الخلية = ١,٢٠٠ + ٠,٨٤ = ٢,٠٤٠ فولت، ويصح هذا فقط إذا لم تكن البطارية تشحن في خلال تسجيل القراءة، ويبين جدول (٣-٥) العلاقة بين قراءة الهيدرومتر ومستوى شحن البطارية.

### جدول (٣ - ٥)

قياس مستوى شحن البطارية

مستوى الشحن %	قراءة الهيدرومتر	فرق الجهد لكل خلية بالفولت
١٠٠	١,٢٦٠	٢,١٠
٧٥	١,٢٣٠	٢,٠٧
٥٠	١,٢٠٠	٢,٠٤
٢٥	١,١٧٠	٢,٠١
فارغة تمامًا	١,١١٠	١,٧٥
١٠٠	١,٢٨٠	٢,١٢
٧٥	١,٢٥٠	٢,٠٩
٥٠	١,٢٢٠	٢,٠٦
٢٥	١,١٩٠	٢,٠٣
فارغة تمامًا	١,١١٠	١,٧٥
١٠٠	١,٣٠٠	٢,١٤
٧٥	١,٢٧٠	٢,١١
٥٠	١,٢٤٠	٢,٠٨
٢٥	١,٢١٠	٢,٠٨
فارغة تمامًا	١,١١٠	١,٧٥

### تصحيح القراءة وفقاً لدرجات الحرارة:

ينبغي تصحيح قراءة الهيدرومتر طبقاً لدرجة الحرارة، والدرجة المثلى للبطارية هي ٢٥°م، وتقلص سعة البطارية إذا تغيرت درجة الحرارة عن ذلك، وباعتبار سعة البطارية ١٠٠% عند درجة ٢٥°م، فإنها تصل إلى ثلاثة أرباع السعة القصوى عند درجة التجمد، وتزداد سعة البطارية بارتفاع درجة الحرارة. على أننا نحصل على أطول عمر للبطارية وأعظم سعة لها إذا حفظت في درجة حرارة بين ١٥°، ٣٠°. وعند قراءة للهيدرومتر مقدارها ١,٢٣٠ لا يتجمد المحلول إلا إذا هبطت درجة الحرارة إلى -٤٠°م، ويبين جدول (٥ - ٤) درجات تجمد المحلول.

### جدول (٥ - ٤)

درجات تجمد المحلول الكهربائي طبقاً لقراءة الهيدرومتر

قراءة الهيدرومتر	درجة التجمد °م	قراءة الهيدرومتر	درجة التجمد °م
١,٣٠٠	-٧١	١,٢٤٠	-٤٦
١,٢٨٠	-٦٨	١,٢٣٠	-٤٠
١,٢٧٠	-٦٣	١,٢٢٠	-٣٦
١,٢٦٠	-٥٩	١,٢١٠	-٢٥
١,٢٥٠	-٥٣	١,١١٠	-٩

تأثير إضافة حمض الفسفوريك (يد ٣ فو أ ٤):

يضاف حمض الفسفوريك بغرض التقليل من تشبع المادة الفعالة بالكبريتات sulphation وبصفة خاصة في حالة تفريغ البطاريات العميق، فقد وجد أن



كبريتات الرصاص (ر ك ب أ) في وجود كميات ضئيلة من حمض الفسفوريك تترسب في شكل بلورات دقيقة، تتسم بشكل أكثر دقة مما تترسب به في حالة عدم وجود حمض الفسفوريك، وتتخلص تأثيرات حمض الفسفوريك على المحلول الكهربى لخلايا الرصاص الحمضية فى الآتى:

(١) يبطئ حمض الفسفوريك من عملية التشبع بالكبريتات بعد التفريغ العميق.

(٢) يحسن حمض الفسفوريك من تكون الرصاص من النوعيات الرابعة Pb(IV) على الشحنة وهذه النوعيات قد تسبب زيادة فى تكون عدد من أكاسيد المواد العضوية ذات المظهر الطحلبى massing.

(٣) تقلل إضافة حمض الفسفوريك من تآكل الرصاص كيميائياً ومن التفريغ الذاتى.

(٤) يقلل الحمض معدل التخلص من المادة الفعالة الموجبة ويزيد من طول دورة حياة الخلايا الرصاصية الحمضية، وبتحديد أكثر. عمر الأقطاب الموجبة.

(٥) فيما يخص تركيز حمض الفسفوريك فى المحلول الكهربائى، فإنه يسلك سلوكاً معاكساً لأيونات الكبريتات.

**الموقف الحالى لتطور بطاريات الرصاص الحمضية:**

بصفة عامة تستعمل بطاريات الرصاص الحمضية من النوع المستخدم كبادئ للحركة (starting) أو للسحب أو من النوع غير المتحرك، وفى بطاريات بدء الحركة، يكون معدل التفريغ الذاتى عالياً للغاية، ولا يوصى باستخدامها فى التطبيقات الكهروضوئية، وبطاريات الجر ذات تفريغ عميق ويسمح فيها بعدد كبير

من الدورات، إلا أن السعر لكل كيلو وات ساعة من الطاقة المخزنة يربو على أربعة أمثال السعر بالنسبة لبطاريات بدء الحركة، وتستعمل البطاريات غير المتحركة في حالة الحاجة إلى تخزين موسمي للطاقة، ولا تسمح هذه البطاريات إلا بعدد محدود جدًا من الدورات كما أنها باهظة التكاليف.

وقد تم حديثًا تصميم بطارية تصلح بوجه خاص للاستخدامات الكهروضوئية، وهذه البطارية من النوع الرصاصي الحمضي وذات صفيحة مسطحة ولقطبها تصميم خاص ومحتوى منخفض من الأنثيمون، وتتمتع هذه البطاريات بتفريغ ذاتي منخفض للغاية وبمتطلبات صيانة بسيطة وعمر طويل واستهلاك منخفض للمياه، والعمر المتوقع لهذه البطاريات نحو ١٥ سنة، ويسمح تصميمها بالاستخدام في نطاق الدرجات من -١٠ إلى ٥٥ م.

وبالإضافة إلى بطاريات الرصاص الحمضية، تتوفر أيضًا بطاريات النيكل - كادميوم، ولهذه البطاريات عمر طويل وعدد كبير من الدورات المسموح بها، كما أنها تتيح استخدام تيارات شحن وتفريغ عالية بما في ذلك التفريغ العميق، كما أن متطلبات صيانتها قليلة، إلا أنه يعيبها انخفاض كفاءتها مقيسة بالساعات (حوالي ٦٠%) وارتفاع تفريغها الذاتي (١٠ - ٥٠ % شهريًا)، وارتفاع سعر التخزين لكل كيلو وات ساعة، ويمكن اعتبار هذه البطاريات خيارًا طيبًا للتطبيقات التي تحتاج لقوى محرك محدودة.



**الباب السادس**

**طاقة باطن الأرض الحرارية**



## مقدمة:

تمثل طاقة حرارة باطن الأرض، والتي تستعمل في توليد الكهرباء منذ أوائل القرن العشرين، مصدرا واسع الانتشار يتواجد في كل مناطق العالم، ومخزونها - كمصدر للطاقة - بالغ الضخامة. وتفيد التقديرات بأنه إذا تم استغلال احتياطيها الموجود، فمن الممكن توليد طاقة منها تكافئ ما ينتجه ١٢ بليون طن من النفط في خلال ٢٠ عامًا.

وتتولد طاقة الأرض الحرارية - على الأرجح - من النشاط الإشعاعي لعناصر الثوريوم، واليوتاسيوم واليورانيوم المتناثرة - بانتظام - في داخل باطن الأرض برمتها، والتي تطلق الحرارة كجزء من عملية اضمحلالها... وتولد هذه العملية حرارة تكفي للاحتفاظ بدرجة حرارة باطن الأرض عند مستوى يقارب ٤٠٠٠ درجة مئوية.

## مصادر حرارة باطن الأرض:

تمثل طاقة باطن الأرض الحرارية الضخمة حوالي ٣٥ بليون ضعف استهلاك العالم الراهن الإجمالي من الطاقة... وفي الواقع فإن نسبة ضئيلة من الحرارة الطبيعية يمكن استخلاصها من القشرة الأرضية (وذلك لأسباب اقتصادية أساسًا) مما يحد من إمكانية استغلالها إلى عمق يزيد عن ٥ كيلو مترات كحد أقصى، ولدى هذا العمق تزيد درجة حرارة القشرة الأرضية بمعدل يبلغ متوسطه من ٣٠ إلى ٣٥ درجة مئوية لكل كيلو متر (وهو ما يعرف بمنحدر باطن الأرض

الحرارى)... وبسبب هذا المنحدر الحرارى ترتفع الحرارة الطبيعية - بالتوصيل والحمل فى بعض المواضع، متسربة إلى الهواء الجوى لدى بلوغها سطح الأرض، وتنتقل الحرارة بالحمل عادة عندما تسرى الموائع الساخنة (كالماء وبخار الماء والغاز) عند السطح، ولكنه يحدث أيضًا عندما تفيض الحمم البركانية من البراكين النشطة، وتختلف كمية الحرارة المنتقلة بالتوصيل من نقطة إلى أخرى ويبلغ متوسطها من ٦٠ إلى ٦٥ مللى وات لكل متر مربع، وهو ما يقل بآلاف المرات عن متوسط الإشعاع الشمسى الذى يرتطم بسطح الأرض، وبسبب هيمنة الطاقة الشمسية، لا تشعر الكائنات البشرية بالحرارة المتسربة من جوف الأرض بالتوصيل.

ويظهر وجود طاقة باطن الأرض الحرارية فقط فى المواضع التى تتسرب فيها هذه الحرارة إلى الهواء الجوى عن طريق وسط حامل (مائع) مثل المياه الدافئة التى تنبثق من الحمم الحارة أو الينابيع المعدنية أو من خلال انطلاق الغازات الساخنة أو الثورات البركانية.

وتعادل الحرارة المتولدة بالنشاط الإشعاعى لدى اضمحلال العناصر غير المستقرة كاليورانيوم والثوريوم والبوتاسيوم - تلك العناصر التى تتوفر بكثرة فى القشرة الأرضية - تعادل الحرارة المفقودة بالتسرب إلى الهواء الجوى.

وهناك خمس صور لمصادر طاقة باطن الأرض الحرارية: الطاقة المائية الحرارية، تضغوط طبقات الأرض، الصخور الجافة الساخنة، الفوهات البركانية النشطة، والصحارة(\*).

---

(\*) الصحارة magma: هى المادة المنصهرة تحت سطح الأرض، والتى تتحول إلى حمم lava فـصخور بركانية عندما تبرد بعد انبثاقها من فوهات البراكين (المترجم)

والمصادر المائية الحرارية تضم الماء الساخن جدًا أو البخار أو كليهما، في الصخور المتهشمة أو المسامية والمحصورة بين طبقات صخور غير نفاذة، وأفضل أصناف الاحتياطيات (في درجة حرارة فوق ٢٤٠ درجة مئوية) هي تلك التي تحتوي على البخار مع القليل من الماء المتكثف أو بلا ماء متكثف على الإطلاق (مصادر يغلب عليها البخار)، وبعض احتياطيات الحرارة المائية مرتفعة الحرارة، تتراوح درجة حرارتها ما بين ١٥٠، ٢٠٠ درجة مئوية على أن تثليثها تقريبًا ذات درجة حرارة معتدلة (١٠٠ إلى ١٨٠ درجة).

وتشمل مصادر الطاقة الأرضية نتيجة التضغوط، المحاليل الملحية ذات درجات الحرارة المتوسطة، والتي تحتوي على الميثان المذاب، وتكون هذا المحاليل محصورة تحت ضغط عال، بين تشكيلات ترسيبية عميقة، معزولة بين طبقات غير نفاذة من الطفلة والصخر الطيني.

ويتراوح الضغط ما بين ٥٠٠٠، ٢٠٠٠٠ رطل / للبوصة المربعة(\*) على أعماق ما بين ١٥٠٠، ١٥٠٠٠ متر، وتتراوح درجات الحرارة ما بين ٩٠ إلى ما فوق ٢٠٠ درجة مئوية.

وتحتوي مصادر الصخور الجافة الساخنة الصخور ذات درجات الحرارة العالية، والتي تتراوح ما بين ٩٠، ٦٥٠ درجة مئوية والتي قد تكون مهشمة ومحتوية على القليل من الماء أو لا تحتوي عليه.

وينبغي أن تهشم هذه الصخور صناعيًا وأن يتم تدوير الحرارة لكي تستخرج الطاقة منها.

وتتواجد طاقة باطن الأرض في صورة فوهات البراكين النشطة في مناطق كثيرة من العالم، والصهارة هي صخور منصهرة في درجات حرارة ما بين ٧٠٠،

---

(\*) وهو ما يكافئ ٣٤٠ إلى ١٣٦٠ ضغطًا جويًا (المترجم)



١٦٠٠ درجة مئوية، وتمثل جيوب الصحارة مصدرًا ضخماً للطاقة، بل هي الأضخم على الإطلاق بين مصادر طاقة باطن الأرض، وإن يصعب استخلاص الطاقة منها.

وتنتشر طاقة باطن الأرض في العالم كله وإن كان انتشاراً غير منتظم وعلى أعماق ضحلة، ويصل مقدار طاقة جوف الأرض التي يمكن - نظرياً - استخلاصها على عمق ٥ كيلو مترات إلى حوالي ١٤٠ x ١٠<sup>٢٤</sup> جول ويحتوى ١٠% من مجمل أراضي العالم على مصادر لطاقة جوف الأرض مما يسهل الوصول إليها، ويوضح الجدول رقم (٦-١) مخزون هذا المصدر لبعض بلدان العالم.

#### جدول (٦ - ١)

مخزون طاقة باطن الأرض من القدرة الكهربائية لمختلف بلدان العالم

المخزون التقديرى بالميجاوات	البلد	المخزون التقديرى بالميجاوات	البلد
٧٩٤٥٠	كينيا	١٩٩٥٠	الأرجنتين
٧٩٤٥٠	كوريا (الشمالية والجنوبية)	٦٣١٠٠	بوليفيا
٢٥٧٠٥٠	المكسيك	١٥١٥٠	الكاميرون
١٩٩٥٠	المغرب	٤٤٦٧٠٠	كندا
٣٠٩٠٠	جينيا الجديدة	٣٠٢٠٠	شيلي
٣٠٩٠٠	نيوزيلندا	٥٢٧٠٥٠	الصين
٣٣٩٠٠	نيكاراجوا	٧٧٦٥٠	كولومبيا
٣٠٢٠٠٠	بيرو	١٢٦٠٠	كوستاريكا

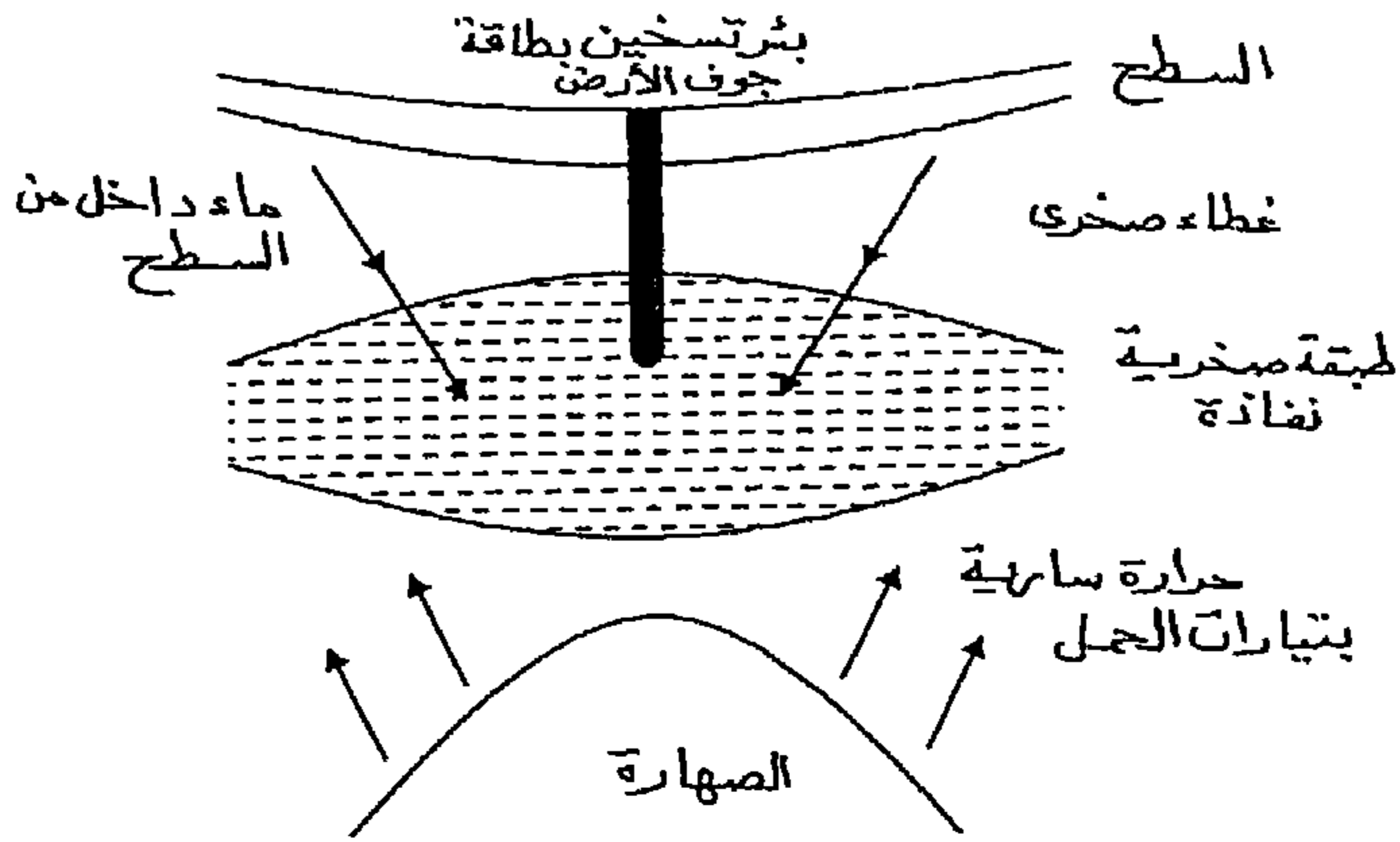
٦٧٦٠٠	الفلبين	١٠٠٠٠٠	الإكوادور
١٠٠٠	البرتغال	٥٠٠٠	السلفادور
١٥٨٥٠	المملكة العربية السعودية	١٥٤٩٠٠	أثيوبيا
٢٣٩٩٠٠	الاتحاد السوفيتي (سابقاً)	٨٩٠٠	اليونان
٥٩٠٠	إسبانيا	٣٨٧	جواد يلوب
٨١٥٠	تاوان	١٢٦٠٠	هندوراس
٦٢٠٠	تنزانيا	٢٢٩٠٠	أيسلندا
٨٧١٠٠	تركيا	١٥٢٠٠	الهند
٥٠١٢٠٠	الولايات المتحدة الأمريكية	٤٣٦٥٠٠	إندونيسيا
٣٩٨٠٠	فينزويلا	٧٥٨٥٠	إيران
٣٧١٥٠	فيتنام	٣٣٩٠٠	إيطاليا
		٧٩٤٥٠	اليابان

### استعمالات طاقة باطن الأرض:

يمكن استعمال حرارة الأرض الداخلية بطريقة مباشرة أو غير مباشرة بتحويل طاقتها الحرارية إلى كهرباء، وكلما ارتفعت درجة حرارة المائع الحامل للحرارة، اتسع مجال التطبيقات العملية، وتشمل التطبيقات المباشرة (مع درجة الحرارة العالية) تقطير المياه، والتبخير على المقياس الصناعي، وهو ما يتطلب تسخيناً حرارياً في طور بخار الماء، بينما تشمل التطبيقات المباشرة على نطاق درجات الحرارة المنخفضة تسخين الصوبات الزراعية وعمليات التحلل الحيوي التي تتطلب مصدراً حرارياً في صورة الماء الساخن، وفي درجات الحرارة الأعلى من ١٧٠ - ١٨٠ درجة مئوية، تستخدم طاقة باطن الأرض في توليد الكهرباء، وكذلك في عمليات معالجة لب الخشب لتحويله إلى ورق.

## نظم التسخين بالماء عن طريق تيارات الحمل:

يوضح شكل رقم (٦-١) مقطعاً عرضياً لمنظومة تسخين بالماء عن طريق انتقال حرارة باطن الأرض بالحمل، إذ تترسب المياه السطحية إلى أسفل من خلال تشققات وصدوع في صخور القشرة الأرضية، ويتم تسخينها في طبقة صخور نفاذة فوق صهارة ساخنة مترسبة، ويمنع الضغط الهيدروستاتيكي الماء من الغليان، والماء الساخن أقل كثافة من الماء البارد الداخل، ولذا فإنه يميل إلى الصعود لأعلى، ويتكون فوق الصهارة مستودع حراري ضخم في صورة ماء ساخن وصخور، وإذا خرج الماء إلى سطح الأرض عن طريق التصدعات الطبيعية فإنه يكون ينابيع ساخنة (أو حمات).



شكل (٦ - ١)

منظومة الاستفادة من طاقة باطن الأرض بالتسخين المائي عن طريق الحمل

ويمكن منع الماء الساخن من الوصول إلى السطح بواسطة غطاء من طبقة صخرية غير نفاذة، ويحصل على القدرة من حرارة باطن الأرض بعمل ثقب خلال

الغطاء الصخري للوصول إلى الماء الساخن المحفوظ تحت ضغط عال، فإذا كان الماء ساخنًا بدرجة كافية فإن هذا كفيل بتوليد البخار عند فوهة النّقب، وهذه هي المنظومة المطبقة حاليًا لاستغلال طاقة باطن الأرض الحرارية.

إن سريان الحرارة عند السطح من المستودع يكون بطيئًا بسبب الغطاء الصخري غير النفاذ وعلى ذلك ونظرًا للاتزان الحراري - يكون سريان الحرارة إلى المستودع هو الآخر بطيئًا.

وربما كانت إعادة ملء المستودع حراريًا بطريقة طبيعية، مقارنة بالمعدل الذي يحتمل أن تستخلص به الحرارة من خلال فتحات النّقوب، غير عالية القيمة، وعلى ذلك فهناك حدود للطاقة التي يمكن استخلاصها من المستودع الحراري لطاقة باطن الأرض.

### **محطات القوى من طاقة باطن الأرض:**

تستغل محطات القوى من طاقة باطن الأرض، البخار المتولد تحت سطح الأرض في الآبار التي يصل عمقها إلى ١ - ٢ كيلو متر، إن درجة حرارة البخار المتولد في بئر طاقة جوف الأرض وضغطه يعتمدان على معدل الإنتاج، فكلما زاد معدل سريان البخار، قلت درجة الحرارة وقل الضغط، في حين يؤدي انخفاض معدل سريانه إلى درجة حرارة أعلى وضغط أكبر.

ومعدل السريان الأمثل هو الذي ينتج أقصى قدرة توليد لمحطة ماء، وعند الينبوع الحار ينتج البخار الجاف عند درجة حرارة ١٧٧° م تقريبًا وضغط يساوي ٧,٨ ضغطًا جويًا.

وتزال السوائل والمواد الصلبة العالقة من البخار عند رأس البئر بفصلها بالطرد المركزي، وعند انبثاق البخار الناجم من طاقة باطن الأرض من جهاز الفصل، يمكنه أن يتمدد في توربين ثم يطلق مباشرة إلى الجو، وما يغادر التربين سيكون خليطاً من البخار والسائل الذي يتعين أن يكون ضغطه أعلى من الضغط الجوي، ويجب أن تكون درجة حرارته أعلى من ١٠٠ درجة مئوية، إن كفاءة كارنوت(\*) لآلة حرارية تعمل بين درجتى حرارة ١٧٧، ١٠٠ درجة مئوية تبلغ ١٧% فقط، ويمكن إدخال تحسين ملحوظ إذا خفضت درجة الحرارة لدى المخرج إلى ٥٠ درجة مئوية، وهذا التخفيض في درجة حرارة الخروج بمقدار ٥٠ درجة يفضى إلى رفع كفاءة دورة كارنوت إلى ٢٨%. وتناظر درجة حرارة خروج مقدارها ٥٠ درجة مئوية، ضغطاً مقداره ٠,١٢ من الضغط الجوي لمزيج من السائل والبخار، ونحتاج أن يكون الضغط الابتدائي بالمكثف أقل من الضغط الجوي. وقد استخدمت وحدات التوليد الابتدائية عند الينابيع الحارة مكثفاً بارومترياً من النوع المبين بشكل (٦-٢)، ويحمل الضغط الجوي المسلط على الماء فى البئر الساخن عموداً من الماء ارتفاعه (ع) متراً، والفرق بين الضغط الجوي والضغط داخل المكثف هو الضغط المطلوب لحمل عمود الماء:

فرق الضغط = ث د ع.

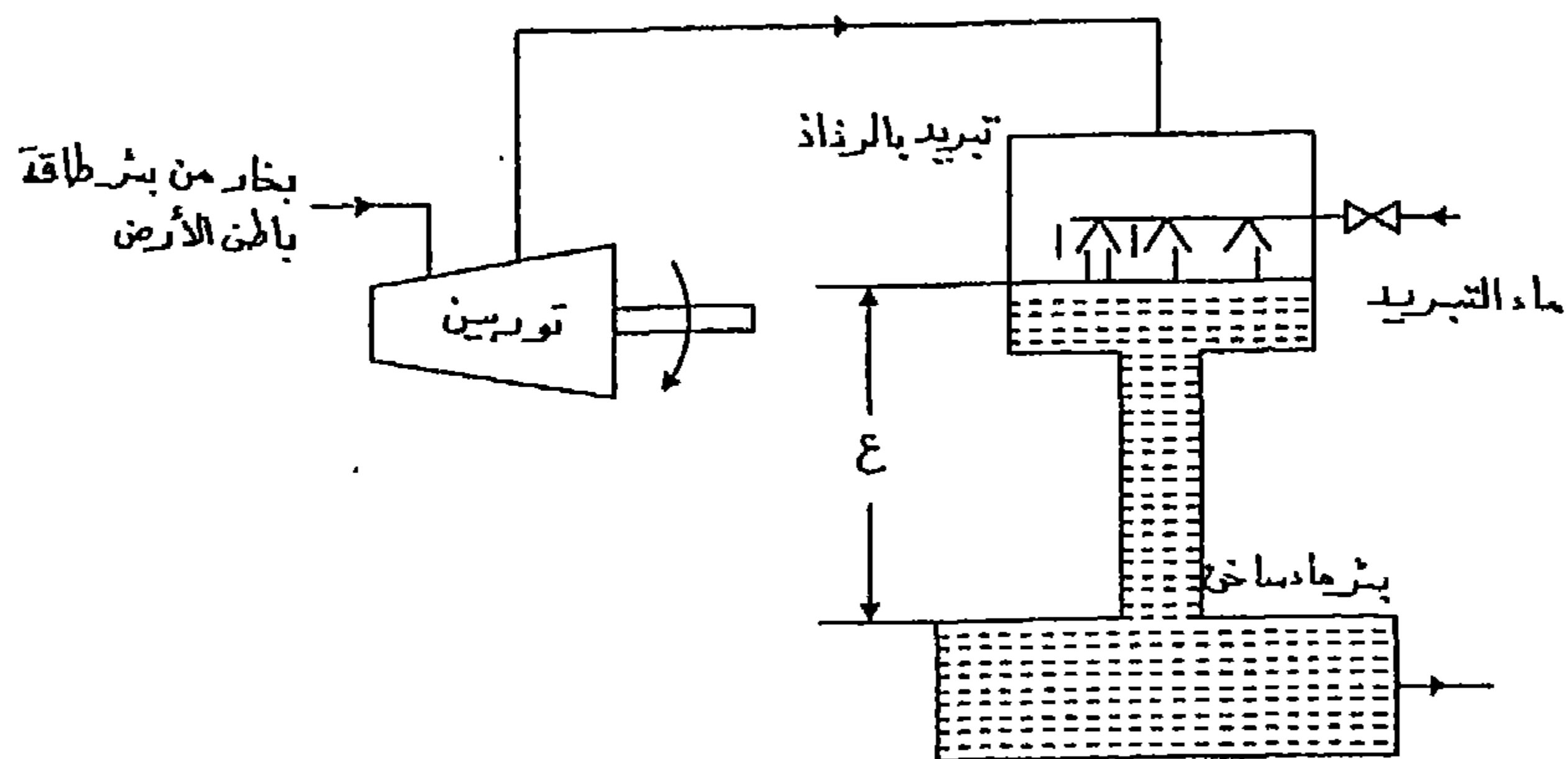
حيث ث = كثافة الماء = ١٠٠٠ كجم / متر<sup>٣</sup>

د = عجلة الجاذبية = ٩,٨ م / ث<sup>٢</sup>

ويتطلب الضغط المناظر داخل المكثف درجة حرارة خروج من المكثف مقدارها ٥٠ م، وارتفاعاً قدره ٩ أمتار لعمود الماء، ويتكثف البخار بتلامسه المباشر مع ماء التبريد.

---

(\*) هى آلة حرارية افتراضية تحول الحرارة إلى شغل ميكانيكى (المترجم)



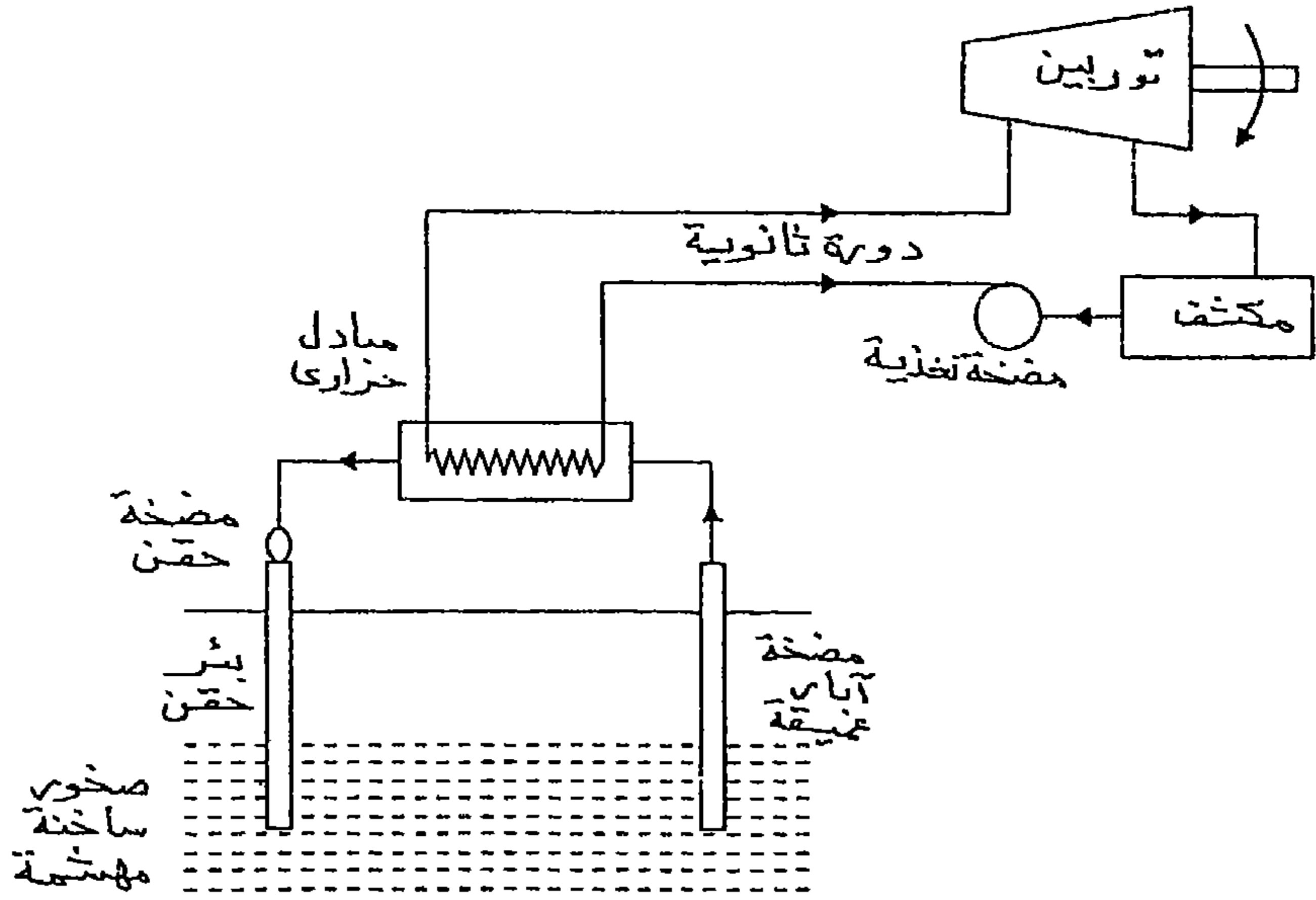
شكل (٦ - ٢)

توربين ومكثف بارومتري

### محطة القوى من طاقة باطن الأرض بالمواقع الجافة:

مواقع الأرض الجافة، حيث لا توجد مياه، هي مصدر آخر ممكن لطاقة باطن الأرض الحرارية، ولكي يقوم الماء بدوره كمائع ناقل للحرارة، يلزم حفره في الموقع، فبعد الثقب، وتهشيم الموقع الصخري في المناطق قرب البئر، يلزم تحسين التلامس الحراري مع الماء، ويمكن استخدام سلسلة من آبار الحقن تحت ضغط، وآبار الاستخراج لاستخلاص الطاقة الحرارية.

وسنحتاج إلى منظومة ثرموديناميكية مقفلة ثانوية ملائمة كالمرسومة بشكل (٦ - ٣) لإنتاج القدرة الكهربائية، وتعتمد إمكانية استخلاص الطاقة من الموقع الجاف على الدرجة التي يمكن بها تهشيم الموقع.



شكل (٦ - ٣)

رسم تخطيطى لمحطة قوى من طاقة باطن الأرض بموقع جاف

### التقدم التكنولوجى:

تستخلص طاقة باطن الأرض الحرارية باستعمال موائع الأرض الطبيعية لاستخراج الطاقة الحرارية، والتي يمكن من خلال توربين استغلالها فى توليد الكهرباء أو استعمالها مباشرة (على سبيل المثال فى التسخين المباشر أو عمليات التسخين خلال العمليات الصناعية).

والاستعمال الأولى لطاقة باطن الأرض هو توليد الكهرباء، ويمكن أن تغذى هذه الكهرباء فى شبكة المرافق العامة أو أن تستخدم - فى موقعها - لإجراء

العمليات الصناعية، وحيث إن طاقة باطن الأرض الحرارية ثابتة، ولا تتعرض لتذبذبات يومية أو فصلية، فإن إدخالها في شبكة المرافق يستحسن أن يكون ضمن الحمل الأساسي من القدرة الكهربائية أو كحمل ذروة قليل التكاليف.

ويمكن استخدام طاقة الأرض في نطاق درجات الحرارة المعتدلة أو المنخفضة للاستعمالات المنزلية وتسخين المياه، والاستخدامات مثل نظم التدفئة المركزية أو في تدفئة المباني السكنية أو البنايات العامة وتزويدها بالمياه الساخنة.

ومن الممكن بالمثل استعمال موائع حرارة جوف الأرض في إمداد العمليات الصناعية والكيميائية وعمليات الطهي بالحرارة، ويتوقف الاستخدام في عملية معينة على طبيعتها وعلى مقدار الطاقة الحرارية الجوفية.

### آفاق استخدام طاقة باطن الأرض في الهند:

لقد تمت محاولة تقييم كمية الطاقة الحرارية المختزنة والمتاحة إلى عمق ٣ كم في ١١٣ موقعاً من مواقع الطاقة الحرارية الأرضية المعروفة بالهند، والتي تتوفر عنها بيانات علمية أساسية، وكان الرقم الذي تم التوصل إليه هو  $40,9 \times 10^{18}$  سعر حراري، وهو ما يعادل - نظرياً - الطاقة الحرارية التي نحصل عليها بإحراق زهاء ٥٧٣٠ مليون طن من الفحم، أو ٢٨٢٣٠ مليون برميل من النفط، وإذا ما طورت كل هذه المواقع الـ ١١٣ المتعارف عليها كمواقع للطاقة الحرارية الأرضية واستغلت للاستعمالات غير الكهربائية، فإن الطاقة المتاحة تكافئ ١٠٦٠٠ ميجاوات.

ولقد حسبت هيئة النفط والغاز الطبيعي ONGC الثروة الكلية من طاقة الأرض الحرارية حتى ٥ كيلو مترات عمقاً وقدرت الحرارة المختزنة والمتاحة بحوالي  $3244,35 \times 10^8$  ميجاوات. سنة، أي نحو  $10^{24}$  سعر حراري، وهو ما



يعادل ٧٥٠.٠٠٠ بليون برميل نפט، وباعتبار هذا المخزون، والموارد المؤكدة حتى الآن خلال فترة الاستكشاف فقد تم التأكيد على اقتراح البدء فى استغلال هذه الموارد حيثما توفرت وعلى نطاق صغير، ومن المتوقع العثور على موائع فى درجات حرارة ما بين ٦٠، ١٢٠ م فى مواقع كثيرة بأودية الهيمالايا، وكامبای جرابان تاتابانى.

### الاعتبارات البيئية:

يؤدى استعمال طاقة الأرض الحرارية - وبالذات للتسخين - إلى انبعاثات غازية ضئيلة، ورغم أن توليد الكهرباء ذو تأثير أفدح على البيئة مما تسببه الحرارة، فإن تأثير منظومات استغلال طاقة الأرض الحرارية يبقى وسطاً ما بين تأثير الوقود الأحفورى ومصادر الطاقة المتجددة كالطاقة الشمسية والرياح والطاقة الكهرومائية.

ويمكن تصنيف التداعيات البيئية لاستخدام حرارة الأرض إلى مجموعتين: تداعيات مؤقتة ترتبط بعمليات الحفر والاستغلال، وأخرى دائمة ناجمة عن صيانة الآبار والحفر التعويضى وتشغيل محطات القوى، وتتضمن آثار تشغيل المحطات تلك الآثار مثل شغل الأراضي وتشويه البيئة النباتية جمالياً، بما فى ذلك - فى بعض الأحيان أبراج التبريد، والضوضاء ونفث الغازات الملوثة (يد ٢ كب، ك أ ٢ والرادون وغيرها) والعناصر السامة (الزئبق والزرنيخ) فى الجو، علاوة على النفايات الصلبة وبقايا المياه المطرودة.

يمكن على أية حال الحد من كل هذه التداعيات باتخاذ الإجراءات الاحترازية الملائمة، فالجور على الأراضي يمكن تحجيمه بحفر عدة آبار موجهة

directional<sup>(\*)</sup> من موقع واحد، ويمكن بالتصميم المعماري الجميل التغلب على تشوه البيئة المحتمل، كما يمكن بالتصميم الملائم الحد من ضوضاء الآلات والبخار.

وتلوث الهواء هو الهم الأكبر المرتبط باستغلال طاقة حرارة الأرض، فلأسباب فنية واقتصادية يتعذر إعادة حقن الغازات التي تنبعث خلال توليد القوى ثانية في المستودع، ورغم أن طرقاً قد اتبعت في بعض الأحيان للتقليل من غاز كبريتيد الهيدروجين (من الينابيع الحارة) إلا أنها يعيبها أن الكيماويات السامة التي تستعمل في عمليات التقليل هذه لا بد وأن تتقل بعيداً كما ينبغي التخلص من الكبريت الصلب بأسلوب صحيح.

ولا تمثل الملوثات الغازية الأخرى بطبيعتها مشكلة ضخمة، فالمواد الأخرى كالراديون والزنابق والزرنيخ وغيرها لا توجد إلا بنسب طفيفة، ولا تؤثر - عملياً - في درجة نقاء الهواء.

وتتراكم النفايات الصلبة عندما تترسب المواد من موانع باطن الأرض ومن مصانع معالجة كبريتيد الهيدروجين. ورغم أن المخلفات تكون أحياناً سامة، فإن كمياتها متواضعة، ويمكن تقليلها - إن لم يكن استئصالها كلية - بالتعامل المرشد معها.

ورغم أن استغلال طاقة الأرض الحرارية يطرح قضايا بيئية متعددة، فإن الكثير من هذه القضايا يمكن التصدي لها بتقنيات التحكم الملائمة، بما يجعل استغلال طاقة حرارة الأرض في توافق مع البيئة التي تقام عليها مشروعاتها، وعلاوة على ذلك، يخلق استعمال طاقة الأرض الحرارية تلوثاً أقل في الهواء والماء ومخلفات ذات أضرار أقل، سواء في توليد القوى المحركة أو - وحتى - بدرجة أعلى - في التطبيقات المباشرة.

---

(\*) هو حقل نفط تتحرف فيه ماسورة الحفر عن الوضع الرأسي (المترجم)



## **الباب السابع**

**مولدات القوى المغناطيسية – الهيدروديناميكية (م هـ د)**



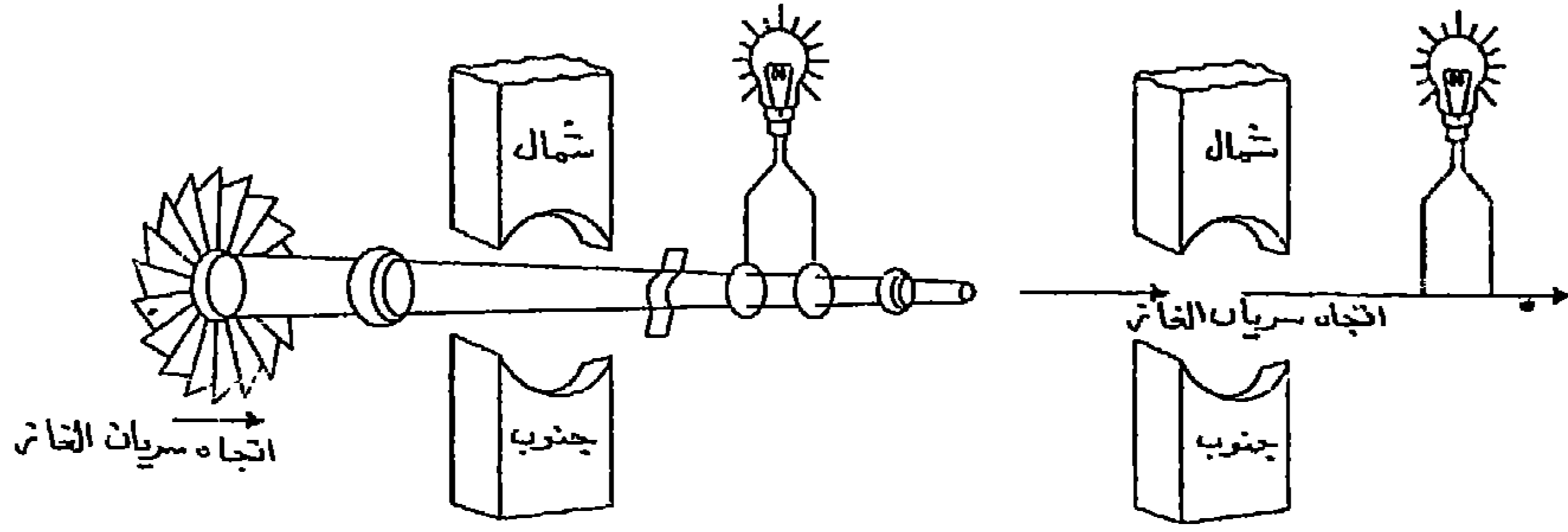
## مقدمة:

فى مولدات القوى من النوع المغناطيسى - الهيدروديناميكى، يحل تيار من غاز متأين ساخن، محل الجزء النحاسى الدوار من المولد التوربينى التقليدى (شكل ٧ - ١) وفى كلا الحالىن يدفع موصل جيد للكهرباء للتحرك خلال مجال مغناطيسى، مولداً - بالتبعية - مجالاً كهربائياً فى الموصل، وحينئذ يمكن استخلاص القدرة من المجال الكهربائى المتولد بعدد الطرق.

وحيث إن الطاقة الحركية فى تيار الغاز تتحول بشكل مباشر إلى طاقة كهربية، فإن مولد القوى من النوع المغناطيسى - الهيدروديناميكى هو جهاز بسيط، أبسط من مثيله التقليدى.

وتتركز معظم التجهيزات الحالية لتوليد الكهرباء فى تحويل الطاقة الحرارية فى الغاز إلى طاقة كهربية، والعلة فى هذا تكمن فى أن للغاز - كموصل - عدداً من المميزات كمادة عاملة.

فى ثلاثينيات القرن العشرين بدأ لانجموير Langmuir استعمال تعبير "البلازما" فى وصف الغازات المتأينة، وتبدو لمثل هذه الغازات خواص شبيهة بتلك التى للمعادن وأشباه الموصلات والمحاليل الإلكتروليتية القوية والغازات المعتادة، وذلك اعتماداً على درجة تأين الغاز، فالبلازما هى غاز متأين، تتأثر خواصه تأثيراً كبيراً بوجود جسيمات مشحونة، وبصفة خاصة خواصه الكهربائية، والبلازما محايدة - كهربياً - فيما عدا على النطاقات الميكروسكوبية.



شكل (٧ - ١)

مقارنة بين المولد التريبنى التقليدى ومولد القدرة المغناطيسية الهيدروديناميكية

### تأيين الغاز:

التأين هو عملية ماصة للحرارة حيث ينتزع إلكترون أو أكثر من ذرة ما. ويمكن أن تقسم آليات التأين - على نطاق واسع - إلى ثلاث فئات: عمليات تأين حرارى، وهى التى تحصل كنتيجة للارتطام بين الجسيمات المستثارة التى يتركب منها الغاز.

والتأين الناجم عن تعرض الغاز لجسيمات ذات طاقة عالية.

والتأين التراكمى المسمى أحياناً بالتأين على مراحل.

سنعرض الآن للخطوات المتعددة التى قد تحدث فى حالة التأين الحرارى لغاز يحتوى الجزيء منه على ذرتين، فلنعتبر الغاز وهو فى درجة حرارة تقارب درجة الصفر المطلق، ولننتصور جزيء هذا الغاز فى هيئة دمبل<sup>(\*)</sup>، أو جسم جاسئ دوار (كما فى شكل ٧ - ٢)، واعتماداً على مدى قرب درجة الحرارة من

(\*) ثقل مكون من قضيب قصير مع كرة أو قرص فى كل طرف، يرفع كوسيلة لتقوية العضلات (المترجم)

درجة الصفر المطلق، ستمكن الجزيئات من الانخراط في حركة انتقالية في أى اتجاه، وبارتفاع طفيف في درجة الحرارة يبدأ الدمبل في الدوران مبدئياً ٣ درجات أعلى من الحرية.

ولا تبدأ درجة الحرية التذبذبية حتى ترتفع درجة الحرارة إلى ١٠٠٠ ° كلفن (انظر شكل ٧ - ٣) وبارتفاع درجة الحرارة تتضمن ارتباطات الجزيئات من الطاقة ما يكفى لتخطيم القوى الرابطة بين الذرتين، مما يفضى إلى انحلالها كما في شكل (٧ - ٤)، وفي ظروف الضغط الجوى، يبدأ الأكسجين فى التحلل عند درجة ٣٠٠٠ ° كلفن تقريباً، فى حين يبدأ تحلل النيتروجين عند درجة ٤٥٠٠ ° كلفن تقريباً، ويمكن التعبير عن تحلل الأكسجين بالمعادلة:



ويعبر عن طاقة التحلل (ط ح) غالباً بوحدات الإلكترون. فولت لكل جزيء، وإذا استمررنا فى رفع درجة الحرارة فإن الإلكترونات فى مداراتها حول نواة الذرة تصبح متهيجة إلى حالات كمومية فوق الحالة الأرضية ground state ويسهم هذا النوع من الالتهياج فى كمية الطاقة الكلية، غير أنه من المفترض إهمال تأثيره حتى درجة ٥٠٠٠ ° كلفن، وإذا ما رفعت درجة حرارة الغاز إلى ما فوق حالة الانحلال فإن الغاز يتأين (كما فى شكل ٧ - ٥) فيغادر الإلكترون الذرة، مما يحولها إلى أيون ذى شحنة موجبة، وحالة تأين ذرة مفردة من الأكسجين يعبر عنها بالمعادلة:

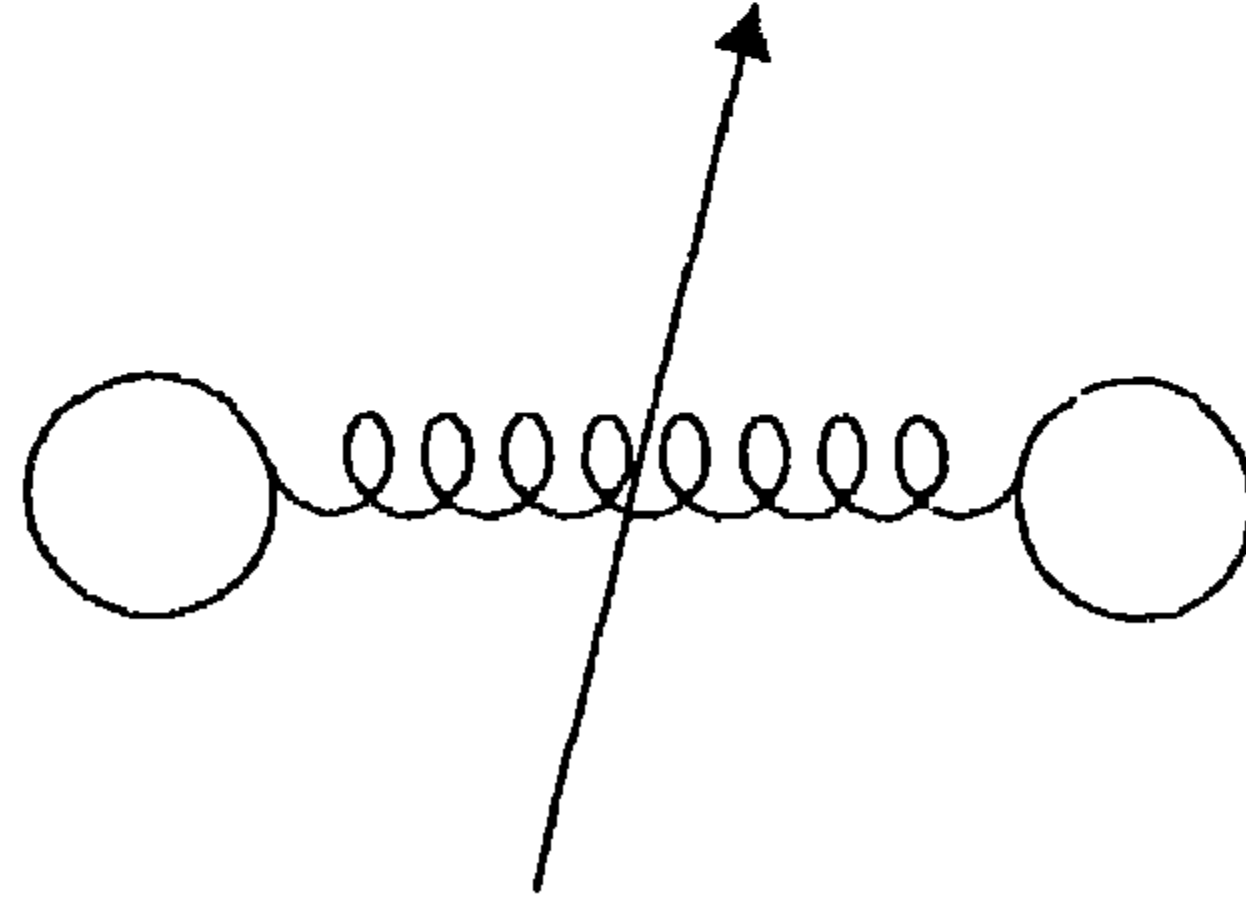


حيث ط ت هى طاقة التأين فى الذرة مقدرة بوحدات الإلكترون فولت لكل ذرة.



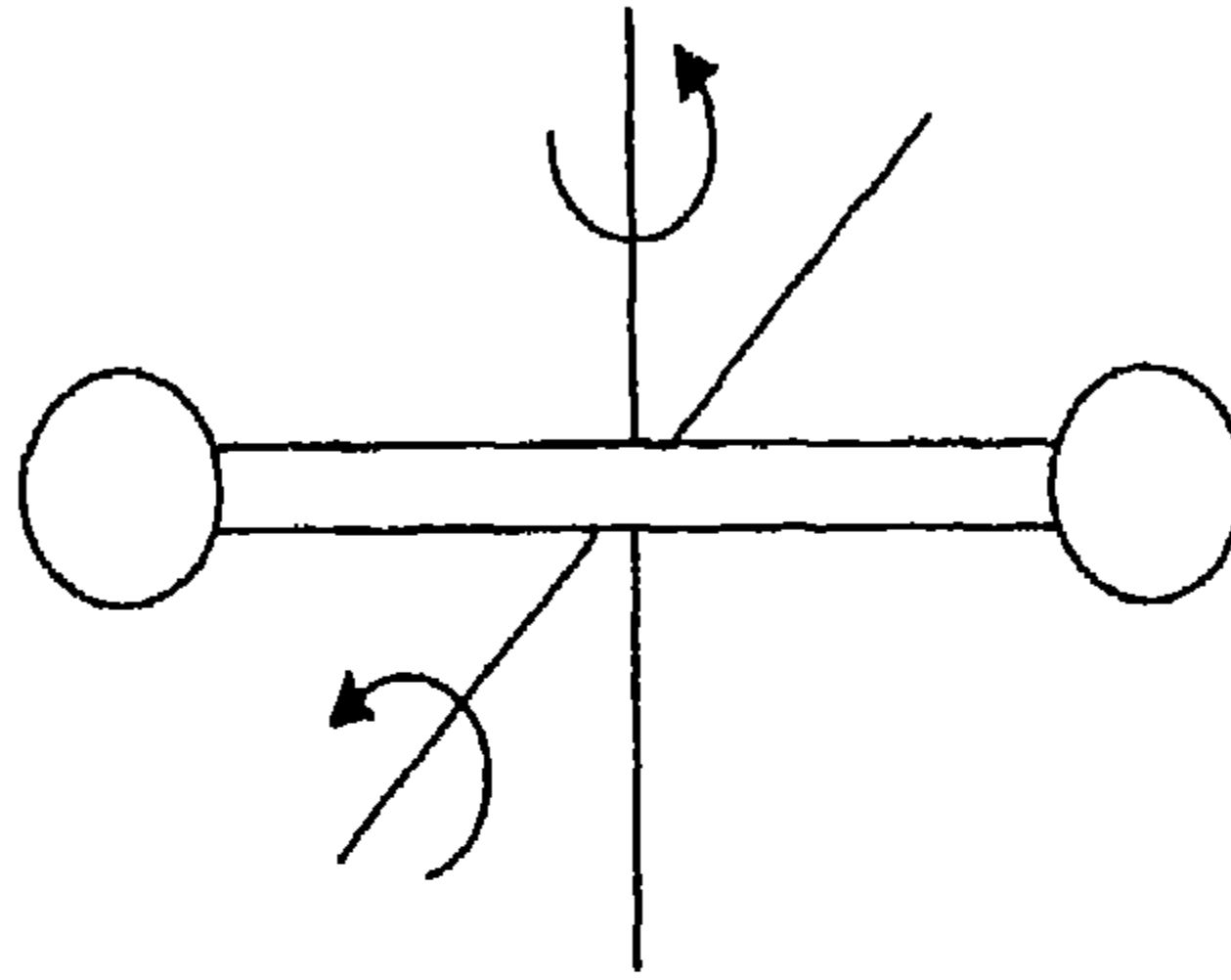
وبذلك تكون طاقة التأين (أو مستوى التأين) هي الطاقة المبذولة في إزاحة إلكترون ما من مداره الذري حول النواة وإحالة إلى حالة السكون على مسافة لا متناهية من نواة الذرة.

وبتخفيض الضغط المسلط على الغاز يمكن تخفيض درجة الحرارة التي يتأين عندها.



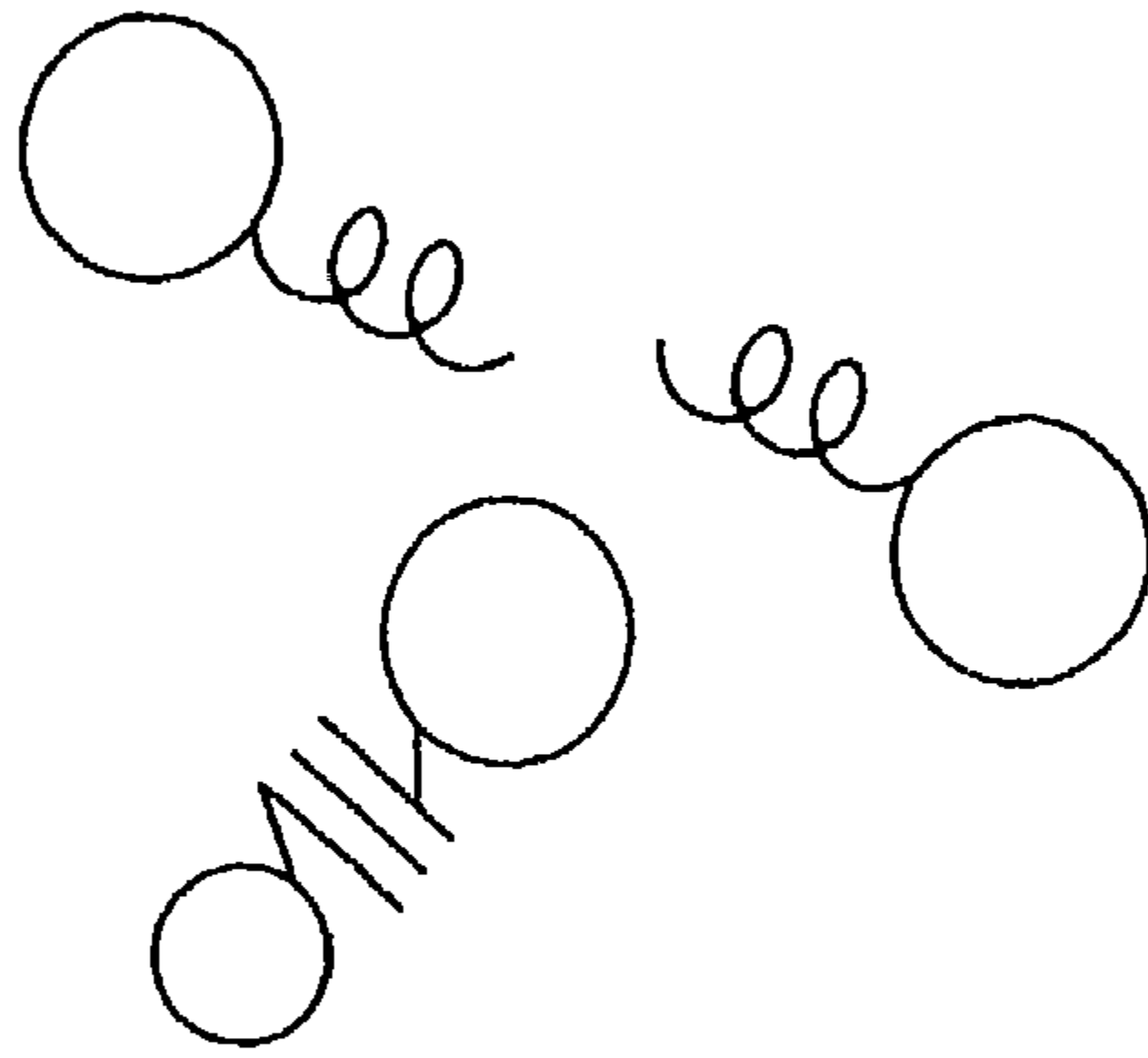
شكل (٧ - ٣)

جزيء ثنائي الذرات له ثلاث درجات من حرية الحركة: انتقالية ودورانية وتذبذبية



شكل (٧ - ٢)

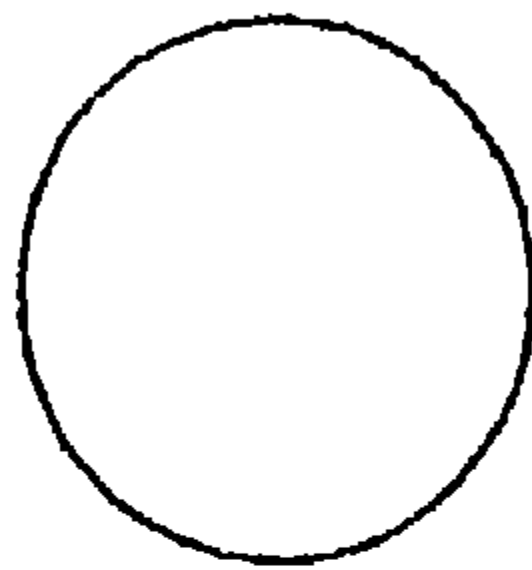
جسم جاسئ دوار له درجتان من حرية الحركة: حركة انتقالية وحركة دورانية



شكل (٧ - ٤)

انحلال الجزيء إلى ذرات متعادلة (محايدة)

إلكترون



أيون  
موجب

شكل (٧ - ٥)

الذرة المتأينة

## أساليب تأيين الغاز:

من بين الثلاثة مستويات لتأيين الغاز التي سبق الإشارة إليها، فإن أهمها - في تصميم مولدات القوى المغناطيسية الهيدروديناميكية - هي تلك التي تتضمن ارتباطات ما بين مكونات الغاز الساخن.

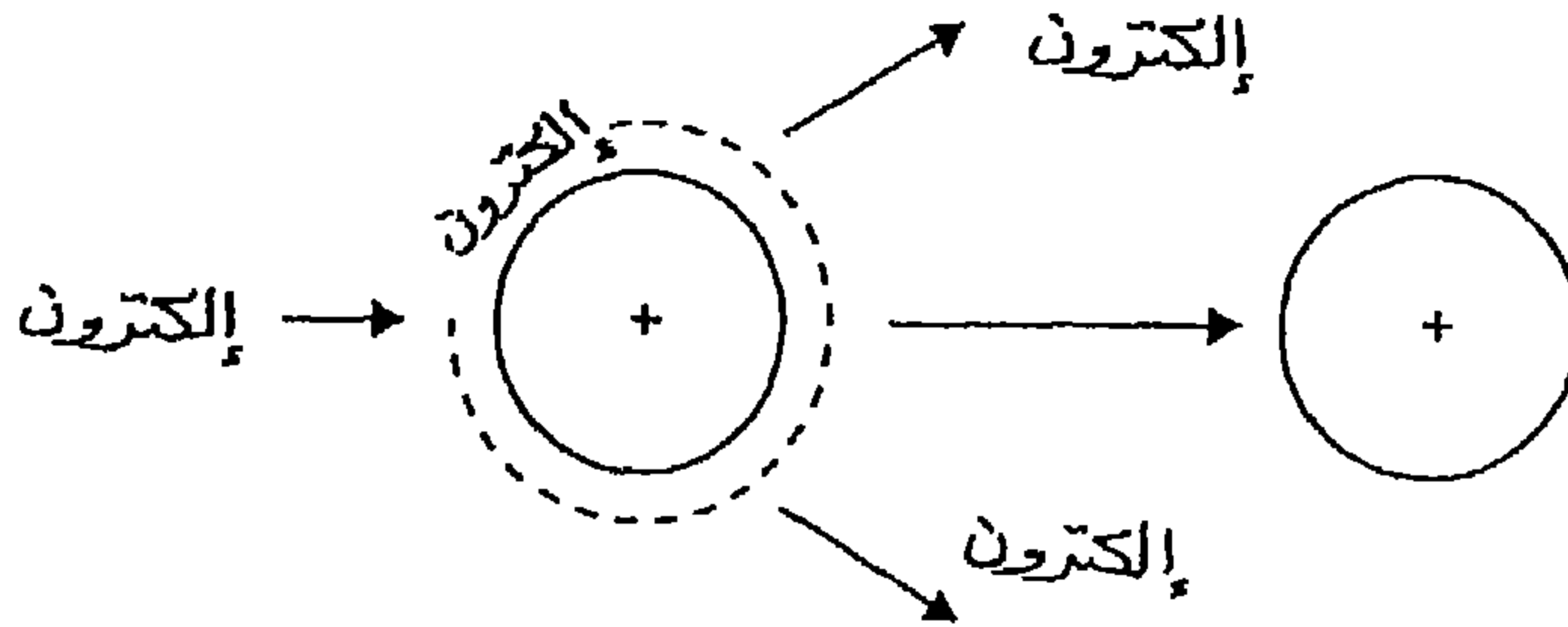
وفي حالة تأين الإلكترونات التصادمية (عن طريق التصادم)، تتولد الطاقة عندما يرتطم إلكترون بذرة من الغاز منتزعاً إلكترونًا آخر من تلك الذرة، وتلعب فكرة مساحة المقطع دورًا جوهريًا في دراسة التأين، ومصطلح (مساحة مقطع التأين) هو مقياس لاحتمال أن تؤين إلكترونات ذات طاقة معينة، ذرة بعينها، وبصفة عامة فمساحة المقطع دالة في طاقة الإلكترون المصطدم وحالة الطاقة التي عليها الذرة المتأينة، وإذا أحدث اصطدام واحد التأين لذرة ما، فينبغي أن تكون طاقة الإلكترون الصادم مساوية - على الأقل - لطاقة تأين الذرة، وهذه القيمة هي الحد الأدنى من مستوى الطاقة للتأين، وإذا كان للإلكترون المصطدم طاقة تتجاوز ذلك الحد الأدنى اللازم لذلك فقد تحتجز الطاقة الفائضة في الإلكترون، متحولة في شكل إلكترون يتحرر خلال عملية التأين، أو يستعمل في استثارة (أو تأيين) أكثر للذرة، وهناك صورة أخرى للتأين عن طريق الاصطدام، تسمى بالتأين الحراري.

ويحدث التأين الحراري عندما تكون طاقة الحركة المتوسطة للجزيئات مرتفعة بما يكفي كي تكفل الطاقة المتحولة خلال اصطدام بين جزيئين محايدين عديمي الشحنة، تأين أحدهما، ويمكن أن يقع هذا عند درجات الحرارة بالغة الارتفاع.

## المولد المغناطيسي الهيدروديناميكي:

في المولد المغناطيسي الهيدروديناميكي، يقوم غاز متأين (أو بلازما) ذو سرعة عالية بدور الموصل المتحرك، وحيث إن الغاز هو نتاج مباشر

للاحتراق، فيمكن الاستغناء عن الوصلة الميكانيكية في صورة عمود دوار. وفي درجات الحرارة العالية سيكون لدى بعض الإلكترونات الحرة بالغاز طاقة الحركة التي تكفي لتأيين ذرة محايدة من خلال الاصطدام (شكل ٧ - ٦)، ولمكونات الاحتراق في الظروف الطبيعية، تحتاج طاقة الإلكترون ( $1/2$  ك ع ٢) للوصول إلى ما يتراوح ما بين ١٢، ١٥ إلكترون فولت لإحداث التأين، ولسوء الحظ فحتى عند درجة ٢٥٠٠ - ٣٠٠٠ م لا يكفي التأين الحادث لإفراز مولد ذي جدوى ويقتضى هذا حقن جزيئات ذات طاقة تأيين أقل، مثل البوتاسيوم أو السيزيوم، وهي العملية المسماة بالبذار seeding.



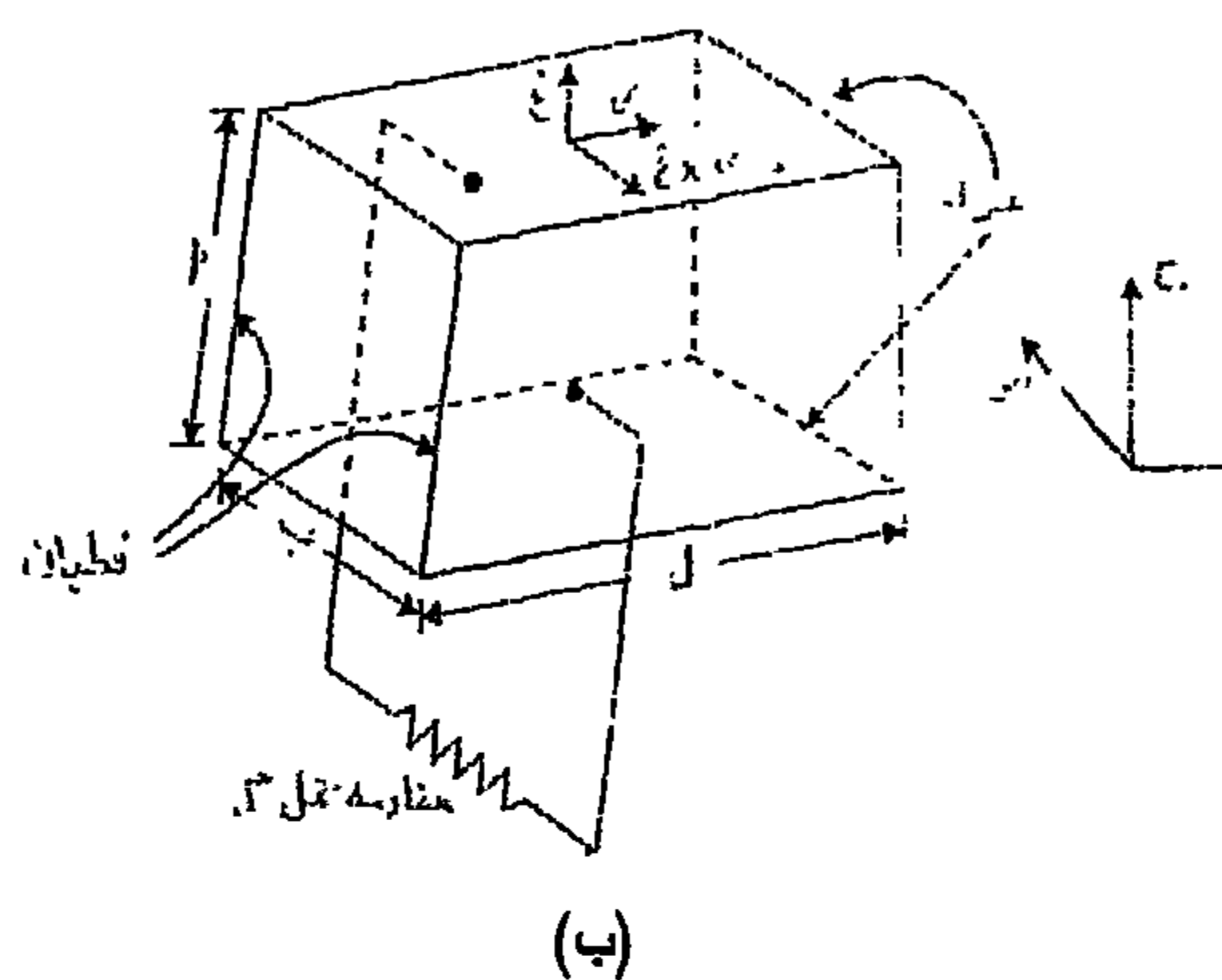
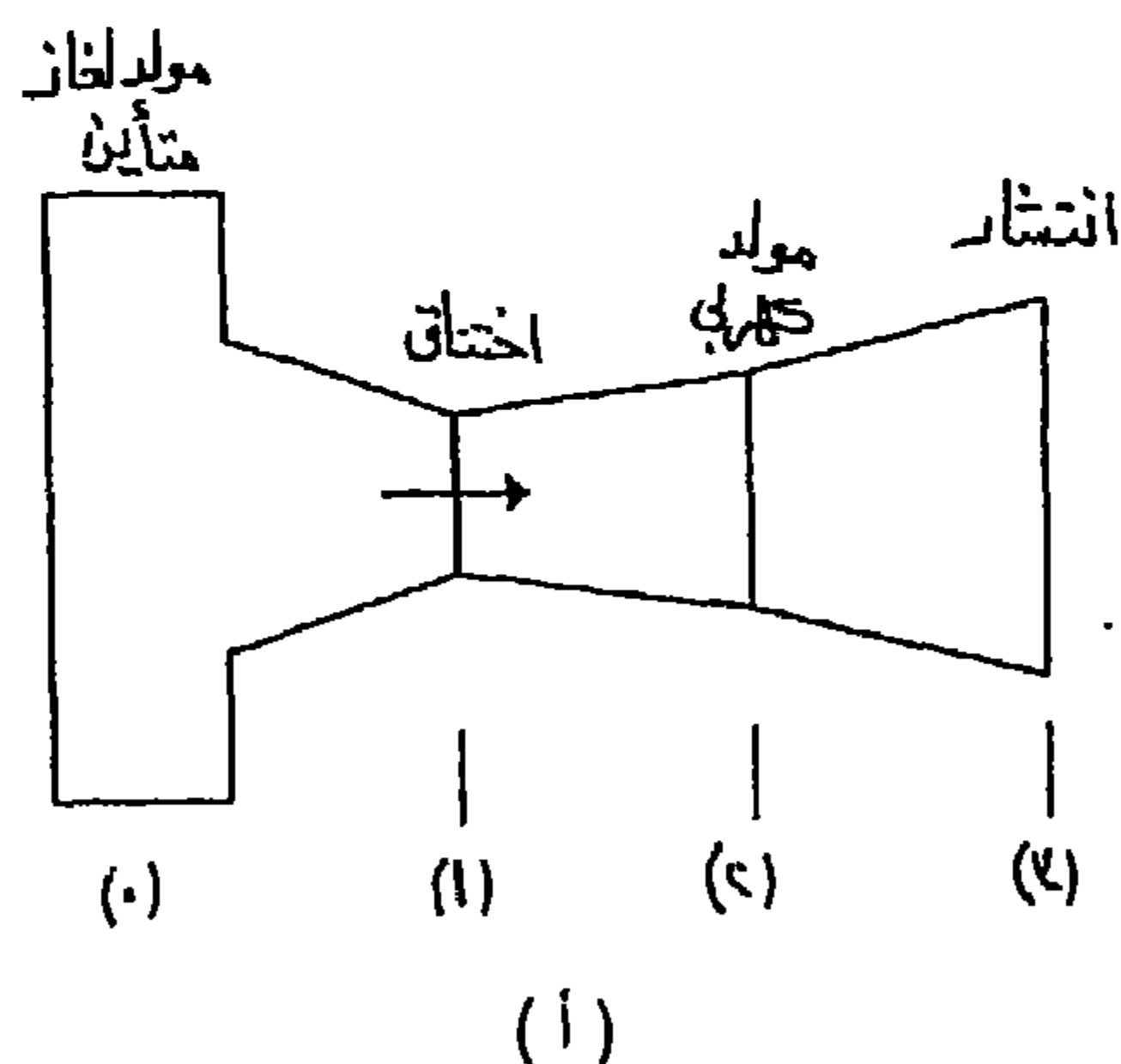
شكل (٧ - ٦)

إلكترون يحدث تأينا اصطداميًا

ويبين شكل (٧ - ٧) رسمًا تخطيطيًا للمولد بغرض تحليل وظيفته، والمولد لدى المدخل مجرى ذو عرض ب وارتفاع أ، وبثبيت السرعة في اتجاه المحور لدى قيمة ثابتة، تستخلص الطاقة الكهربائية فقط من طاقة الغاز الحرارية، ويمكننا اعتبار ذلك عملية على مرحلتين، فحث فاراداي(\*) ينزع الطاقة الكهربائية فقط من

(\*) حث فاراداي أو الحث الكهرومغناطيسي هو إنتاج فرق جهد عبر موصل كهربى واقع فى مجال مغناطيسى متغير (المترجم)

طاقة الحركة للانسياب حينما يقطع الغاز الموصل خطوط القوى المغناطيسية، وعلى أية حال، فسرعان ما يستعيد الغاز سرعته، على أن درجة الحرارة الإستاتيكية تهبط.



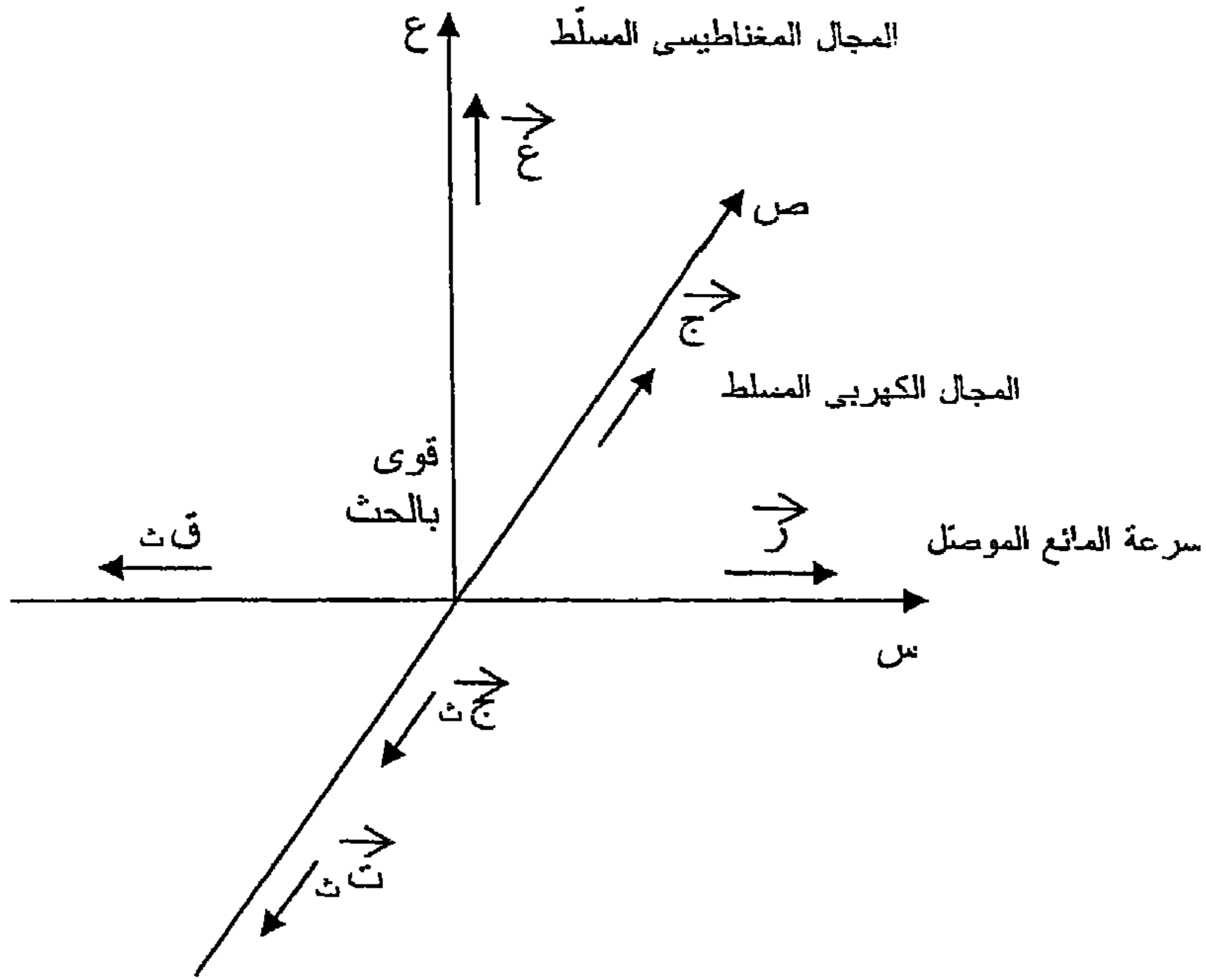
شكل (٧ - ٧)

( ٧ - ٧ أ ) شكل تخطيطى لمولد غاز، واختناق، ومولد كهربى ثم منظومة انتشار

( ٧ - ٧ ب ) المولد الكهربى ونظام الإحداثيات

سنضع الافتراضات التالية فى تحليلنا:

- (١) الغاز يسرى داخل المولد بمعدل ثابت عند الموضع (١) فى الاتجاه الموجب لزيادة البعد (س) بسرعة  $v$  وضغط  $p$  ودرجة حرارة  $T$ .
- (٢) افتراض وجود فيض مغناطيسى منتظم كثافته  $B$  فى الاتجاه الموجب للإحداثى (ع)، والجدران لى القيمة  $E = \pm \frac{A}{2}$  من مادة عازلة، والجدران لى القيمة  $V = \pm \frac{B}{2}$  من مادة موصلة تستخدم كأقطاب تجمع التيار وتوجهه نحو الحمل الخارجى م.
- (٣) خواص الوسط فى الحالة الغازية وسرعة سريان الغاز جميعها متجانسة عبر أى مقطع.
- (٤) يفترض أن المائع غاز مثالى (عديم الاحتكاك وذو انضغاطية compressibility مثالية).
- (٥) تهمل الاضطرابات التى يحدثها التيار فى المجال المغناطيسى المسلط.
- (٦) تهمل التيارات المتسربة من أطراف الأقطاب.
- (٧) التوصيلية الكهربائية مقدار مقياسى (غير متجه) scalar، قيمته تحدد درجة الحرارة والضغط المتوسطان فى مجرى المولد.
- (٨) يهمل انتقال الحرارة من المجرى.
- (٩) نظام الإحداثيات المستخدم لتوصيف الظاهرة الحادثة فى المولد موضح بشكل (٧-٨). سنفترض مائعا ذا توصيلية كهربائية سرعته  $v$  فى اتجاه س الموجب، ومجالا مغناطيسيا كثافة فيضه  $B$  فى اتجاه عمودى عليه (اتجاه ع الموجب). والتفاعل ما بين مجال السرعة، والمجال المغناطيسى يولد مجالا كهربيا بالحث  $E = -\frac{dB}{dt}$  متعامدا مع كل من المتجهين ر، غ. ويعطى مقدار هذا المجال بحاصل الضرب الاتجاهى  $E = v \times B$



شكل (٧ - ٨)

#### نظام الإحداثيات المطبق

وحيث إننا قد افترضنا أن التوصيلية مقدار مقياسي لا اتجاهي، فمن الممكن ربط كثافة تيار الحث بمجال الحث بالعلاقة  $\vec{J} = \sigma \vec{E}$

وفي نفس الوقت يتفاعل تيار الحث مع المجال المغناطيسي فتتولد بالحث قوة لورينتس (\*)  $\text{lorentz force}$  تعطى بحاصل الضرب الاتجاهي  $\vec{J} \times \vec{B}$

---

(\*) قوة لورينتس: هي القوة المؤثرة على شحنة من جراء مجال كهرومغناطيسي، وهي دالة في قيمة الشحنة وشدة المجالين الكهربائي والمغناطيسي وسرعة الجسيم. (المترجم)





مكونات المولد التي قد تتلامس معها، ومن المحتمل جدًا أن تسبب تلك المادة زيادة في تآكل أجزاء المولد كيميائيًا.

٢ - المواد الصامدة للحرارة: العثور على المواد التي تستطيع الصمود لدرجات حرارة تشغيل مثل هذه المولدات المرتفعة، يمثل مشكلة رئيسية في تصميم مولدات مغناطيسية هيدروديناميكية ذات عمر طويل، وهي مشكلة تتجلى خطورتها عندما تأخذ في الاعتبار أن المواد العازلة والمواد الموصلة التي تصمد لدرجات حرارة من ٢٠٠٠ إلى ٣٢٠٠ درجة كلفن لازمتان كليهما لفترات طويلة في جو قد يحتوى أبخرة المعدن القلوى المستعمل في رفع توصيلية الغاز.

ويبدو أن التجسستن والتتاليوم هما أكثر المواد صلاحية للاستخدام كأقطاب في المولدات ذات الغازات الخاملة، على افتراض أنها لا تتفاعل مع المعادن القلوية، وأنها تتوافق مع مواد العزل الكهربى المستعملة في منطقة المجرى.

٣) مشاكل انتقال الحرارة: يمكن تقليل المشاكل الخاصة بنوعية التصنيع إلى حد ما بتبريد الجدران، على أن هناك أمرًا واحدًا يحد من هذه العملية، فلا ينبغي تبريد الأقطاب إلى الحد الذى تعود معه الإلكترونات إلى الاندماج مع الأيونات المتواجدة على مقربة منها، وبالتالي تقلص التوصيلية الفعالة للغاز، وليس هناك حدود بالنسبة لمدى تبريد الجدران العازلة، إلا أن التبريد يجب - فى جميع الأحوال - ألا يخفض درجة حرارة الباطن bulk بأكثر من أجزاء قليلة من المائة.

٤) الفوائد المغناطيسية: إن القوى المحركة فى مولد هيدروديناميكي مغناطيسى اللازمة للمجال المغناطيسى قد تصل إلى جزء ملموس من

القوى المولدة، ويمكننا أن نعتبر حالة مغناطيس كهربي ذي قلب هوائي، وآخر ذي قلب حديدي أو مغناطيس من مادة ملائمة لدرجات الحرارة شديدة الانخفاض وذات توصيلية فائقة.

ويقدم المغناطيس ذو التوصيلية الفائقة ميزتين رئيسيتين مقارنة بالمجال المغناطيسي الذي يولده مغناطيس لفاته من النحاس الأحمر. فالقدرة على حمل التيار للموصلات الفائقة المتوفرة الآن... أولا تربو بكثير عما يمكن الوصول إليه من النحاس الأحمر بحوالي مائة مرة، وعلى ذلك يمكن تقليل حجم اللفات بدرجة ملموسة، وثانيًا: حيث إن الموصل الفائق ذو مقاومة كهربية تصل إلى الصفر، فلا توجد فواقد جولية  $Joule\ losses$  حرارية في المغناطيس، والقدرة اللازمة لتوليد المجال تقل بعدة مرات.

٥) توليد القدرة بتيار متردد: لتوزيع القدرة بكفاءة، يلزم تيار متردد، ومن نقاط البحث الطريفة إمكانية توليد تيار متردد رأسًا في قناة الجهاز الهيدروديناميكي المغناطيسي، وتجرى الآن بحوث على ما يسمى بأجهزة التوزيع غير ذات الأقطاب.



**الباب الثامن**

**الخلية الوقودية**



## مقدمة:

تتجنب خلية الوقود عملية الاحتراق في درجات الحرارة العالية، وما يستتبعها من عمليات تجرى في كل أساليب تحويل الطاقة تقريباً، والتي تصمم لتوليد الطاقة الكهربائية.

وبواسطة خلية الوقود من الممكن تجنب التحول إلى عملية التسخين وما يصاحبها من عمليات ميكانيكية وكهربية، ففي خلية الوقود تتحول الطاقة الكيميائية بالوقود مباشرة وبكفاءة إلى طاقة كهربية (بجهد كهربى منخفض وتيار ثابت) وبذلك نتحاشى الكثير من الملوثات التي تتكون عادة في درجات الحرارة العالية، وتوصف خلية الوقود أحياناً كبطارية أولية يخزن فيها الوقود والمادة المؤكسدة خارج البطارية بحيث يمكن تغذيتهما حسب الحاجة.

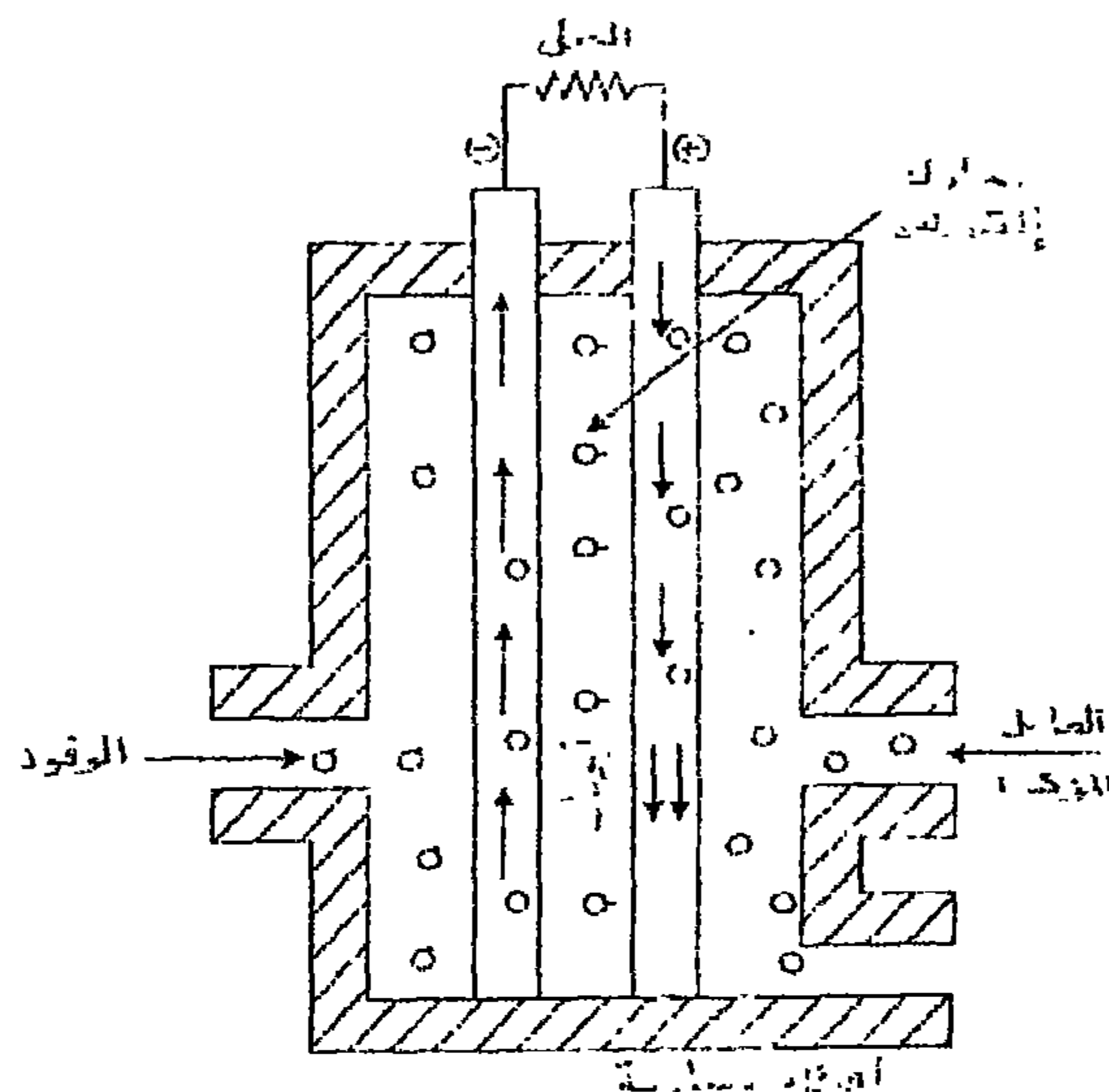
وكميزة في هذه الترتيبية يمكن أن يتم التحول - على الأقل من الناحية النظرية - عند درجة حرارة ثابتة، وبالتالي فلا تنطبق محددات كارنوت التي تحد من الكفاءة.

وقد استعملت خلية الوقود من نوع الهيدروجين - الأكسجين، وهي أكثر الأنواع تطوراً بتوسع في تطبيقات الفضاء، وفي هذه الخلايا يتم تخزين الطاقة في هيئة هيدروجين وأكسجين سائلين، ينتجان - عند اندماجهما في خلية الوقود - طاقة كهربية، وتستخدم خلايا الوقود الهيدروكربونية في التطبيقات الأرضية، ويعود مفهوم الخلية الوقودية إلى السير ويليام جروف (١٨٣٩)، وفي عام ١٩٣٢ عرض فرانسيس توماس ليكون خلية وقود تعمل بالهيدروجين والأكسجين.

وفي خلال عقد الخمسينيات من القرن العشرين تم تطوير العديد من خلايا الوقود القادرة على إنتاج مستويات عالية من القدرة.

## تركيب الخلية الوقودية:

يوضح شكل (٨ - ١) العناصر التي تتكون منها الخلية الوقودية، حيث ينتشر غاز الوقود خلال المصعد anode ويتأكسد، ومن ثم يطلق إلكترونات إلى الدوائر الخارجية، وينتشر المؤكسد خلال المهبط cathode فتختزل الإلكترونات القادمة من المصعد عن طريق الدائرة الخارجية، والمبدأ الذي يقوم عليه أى تفاعل احتراق، سواء فى خلية وقود أو آلة حرارية، واحد، حيث يتضمن تفاعل الاحتراق انتقال إلكترونات من جزيئات الوقود (ومن ثم تأكسدها) إلى جزيئات المؤكسد التي يتم اختزالها، وفى الآلات الحرارية تمتزج جزيئات الوقود والمؤكسد امتزاجاً كاملاً بحيث تنتقل الإلكترونات رأساً من جزيئات الوقود إلى جزيئات المؤكسد، أما خلية الوقود فهى جهاز يحفظ جزيئات الوقود بعيداً عن الامتزاج بجزيئات المؤكسد، متيحاً انتقال الإلكترونات عن طريق وسيط مرور معدنى قد يحتوى حملاً ما.



شكل (٨ - ١)

رسم تخطيطى لخلية قود

تضم خلية الوقود قطبين موصلين كهروكيميائياً، يفصل بينهما محلول كهربى<sup>(\*)</sup> electrolyte، ويغذى الوقود خارج القطبين، فى حين يغذى الهواء أو الأكسجين خارج الطرف الآخر، وعند توصيل القطبين معاً وسريان التيار الكهربى يستهلك كل من الوقود والوسط المؤكسد، فى حين لا يستهلك القطبان خلال هذه العملية، وتمضى خلية الوقود فى توليد القدرة الكهربائية طالما استمر تزويدها بالوقود وبالعامل المؤكسد حول القطبين، وطالما استمرت عملية إزالة نواتج التفاعل.

ومن الممكن أن تتجاوز الكفاءة الحرارية النظرية لخلايا الوقود نسبة ٩٥%، أما من الناحية العملية فالأرجح أن تتراوح ما بين ٣٠، ٦٠ %، ويعزى هذا الفقدان فى الكفاءة إلى عدم قابلية العمليتين لدى القطبين للانعكاسية<sup>(\*\*)</sup>، وإلى ارتفاع استهلاكات منظومات التحكم والمنظومات المساعدة من الطاقة.

وتحتفظ خلايا الوقود بكفاءتها التشغيلية عبر مدى واسع من التغيرات فى الحمل، ويقل استهلاكها للوقود فى وقت عدم تشغيلها بكثير عن استهلاك معدات التوليد التقليدية الأخرى، ومن هنا كانت ذات إفضلية فى الأداء لدى الأحمال المنخفضة، وهو ما يزيد كثيراً من تنوع مجالات استعمالها.

### بعض القواعد الكهروكيميائية:

تعمل خلايا الوقود طبقاً للقواعد الكهروكيميائية، وسنستعرض فيما يلى تلك الأفكار الضرورية لاستيعاب عمل خلية الوقود.

---

(\*) المحلول الكهربائى electrolyte : هو مركب كيميائى يتأين عندما يتحلل ويصبح وسيطاً موصلًا للكهرباء (المترجم)

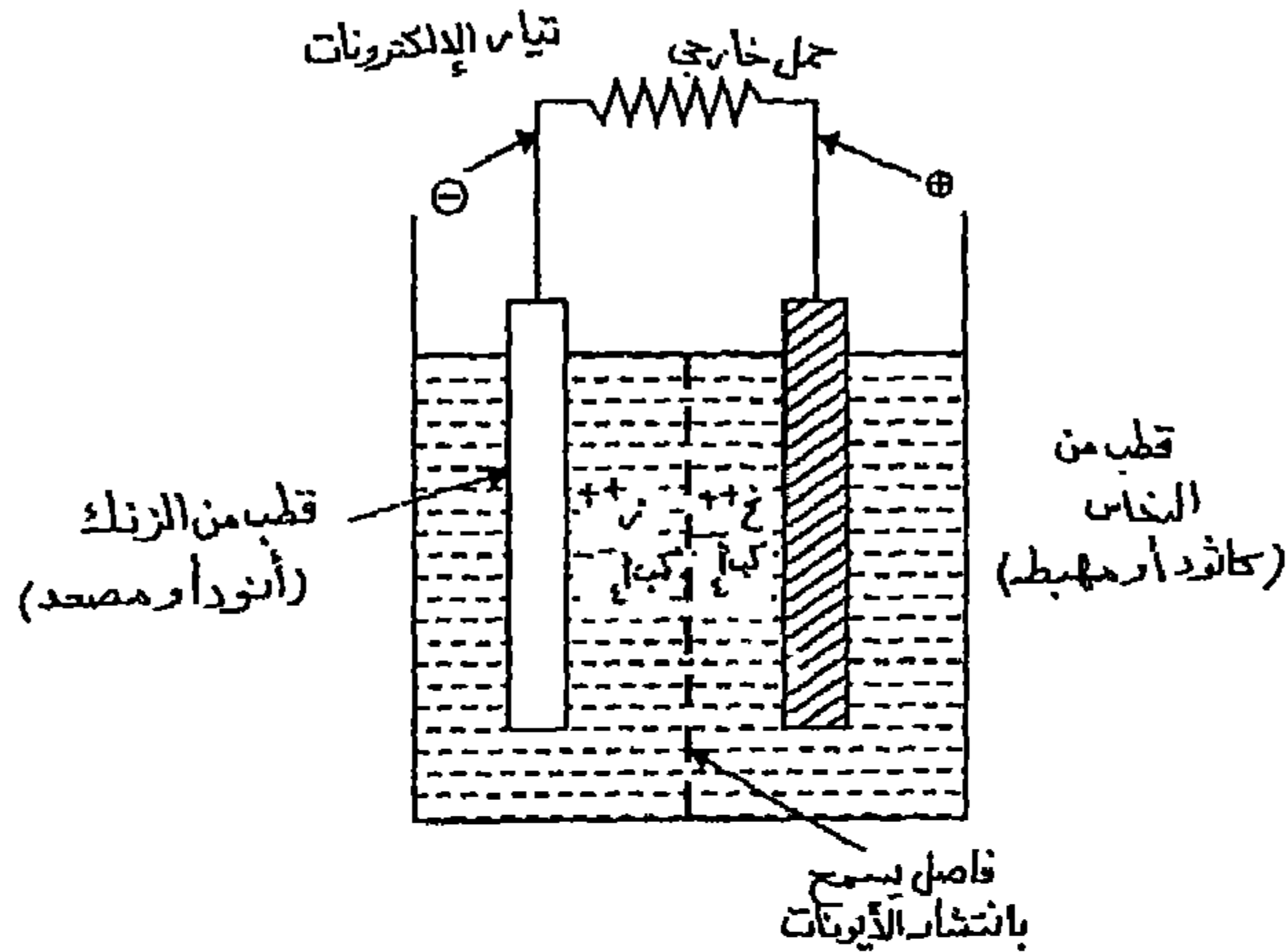
(\*\*) عدم الانعكاسية non - reversibility تعنى عدم تحويل العملية (كالتفاعل الكيميائى مثلاً) لتجرى فى الاتجاه المضاد (المترجم)



سنبحث أولاً خلية دانييل أو عمود دانييل Daniell cell (شكل ٨ - ٢)، والتي تتكون من إناء مقسم إلى جزأين بواسطة حائل يسمح بترسب الأيونات فيما بينهما، ويحتوي القسم الأيسر على محلول من كبريتات الزنك، وتتم الدائرة بالتوصيل بين القطبين بسلك يمكنه إمرار التيار الكهربى عبر حمل خارجى.

ويطلق لفظ المصعد anode على القطب الذى يحدث لديه التأكسد (ويعنى التأكسد فى حالتنا هذه فقدان الإلكترونات) فالإلكترونات لدى المصعد حرة فى أن تغادره وتسرى خلال التيار الخارجى، أما المهبط cathode فهو القطب الذى يحصل لديه الاختزال، فالكاثود يتلقى الإلكترونات من الدائرة الخارجية،.

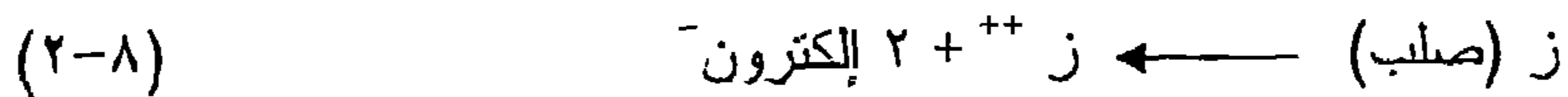
والإلكترونات التى تصل إلى المهبط تحتبس هناك بالتفاعل مع أيونات النحاس ( $^{++}$  نح) وتشارك فيه:



شكل (٨ - ٢)

خلية دانييل

تقصى أيونات النحاس من المحلول عند المهبط، وتدخل أيونات الزنك فى المحلول من المصعد، والأيونات الموجبة ( $Z^{++}$ )، ( $NH^{++}$ ) فى المحلول تتحرك نحو المهبط فى حين تتحرك أيونات الكبريتات السالبة صوب المصعد، والإلكترونات التى تغادر المصعد تتحرر طبقاً للتفاعل.



ومن دمج التفاعلين لدى المصعد والمهبط نحصل على



ومن الملاحظ - طبقاً للمعادلة (1-8) أن مرور 2 مول من الإلكترونات عبر الخلية ينتج 1 مول من النحاس الذى يترسب كطبقة طلاء، 1 مول من أيونات الزنك (طبقاً للمعادلة 2-8)، والجرام. مول من الإلكترونات يحوى عدد أفوجادرو ( $6.02 \times 10^{23}$ ) من الإلكترونات، وله شحنة كلية قدرها 96493 كولوم، وعلى ذلك فإن السلك الذى يحمل تياراً شدته 1 أمبير لمدة 96493 ثانية سيمرر 1 مول من الإلكترونات أو شحنة مقدارها 96493 كولوم، والشحنة التى تساوى عدد أفوجادرو من الإلكترونات تسمى بالفاراداي ويرمز لها بالرمز (ف).

فإذا ما افترضنا أن الصورة الوحيدة من الشغل النافع فى منظومتنا هى الشغل الكهربى، فإن الشغل الكهربى الذى تبذله الخلية يعطى بمقدار الشحنة التى تسرى منها مضروباً فى القوة الدافعة التى تسبب سريانها، وبعبارة أخرى فرق الجهد الكهربى بين قطبي الخلية، ويعطى مقدار الشحنة كحاصل ضرب عدد الإلكترونات مقدراً بالمول، والتى تشارك فى التفاعل، مضروباً فى عدد وحدات الكولوم لكل مول من الإلكترونات، أى أن:

$$\text{الشغل الكهربى} = n \cdot q \cdot F$$

حيث تمثل  $n$  عدد الإلكترونات بالمول، وينبغي أن يكون فرق الجهد  $F$  معكوس فرق جهد الخلية، وهو فرق الجهد مقيسًا في ظروف الدائرة المفتوحة.

### كفاءة خلية الوقود:

تتكون خلية الوقود من قطبين موصلين خارجيًا بدوائر معدنية، حيث يجب أن تمر إلكترونات التكافؤ من قطب (أو إلكترود) الوقود، وداخليًا بواسطة موصل للكهرباء (المحلول الإلكتروليتي) الذي تسرى خلاله الأيونات لتكتمل الدائرة، والمعادلة الكيميائية التي تصف هذا التفاعل هي:

وقود + مادة مؤكسدة = نواتج تفاعل.

والتفاعل الحاصل عند القطبين يمثل بالمعادلتين:

وقود = أيونات + إلكترونات (عند المصعد)

مادة مؤكسدة + إلكترونات = أيونات (عند المهبط)

والقوة الدافعة الكهربائية التي ستدفع الإلكترونات التي تتحرر لدى المصعد للمرور خلال الحمل الخارجي، تتناسب مع التغير في طاقة جيبس الحرة **Gibbs free energy**.

وتعرف الطاقة الحرة لجيبس  $\Delta G$  بالمعادلة:

$$\Delta G = \Delta L - \Delta D \text{ ر كيلو سعر / مول}$$

حيث  $\Delta L$  هو التغير في الإنثالبي في أثناء التفاعل (غالبًا ما تسمى بحرارة التفاعل أو حرارة الاحتراق)،  $\Delta D$  هو التغير في الإنتروبيا للعملية، فإذا كانت العملية انعكاسية (قابلة للعكس)، فالمقدار  $(\Delta D)$  يمثل مقدار الحرارة المنتقلة عند درجة حرارة ثابتة، ويعرف مقدار فرق الجهد الدافع بالمعادلة:

(٤-٨)

$$\Delta ج = - ن ق ف$$

حيث ف هي القوة الدافعة الكهربائية العكسية التي تبعث بالإلكترونات من المصعد إلى المهبط، وتمثل المعادلة الأخيرة أقصى شغل كهربى يمكن أن نتوقعه من عملية أكسدة عكسية تامة لمول من الوقود.

وكفاءة خلية الوقود هي مقدار التغير في الطاقة الحرة (التي هي أقصى قيمة للشغل المفيد بوسعنا الحصول عليه من أية منظومة) مقسوماً على حرارة التفاعل.

$$\xi = \Delta ج \div \Delta ل = ١ - د \frac{\Delta ر}{\Delta ل} \quad (٥-٨)$$

والكفاءة طبقاً للمعادلة (٥-٨) تمثل الكفاءة الحرارية لخلية الوقود بمفردها ولا تدخل فيها الفواقد التي تلازم الأدوات المساعدة التي لا بد لها فى أى تنفيذ واقعى.

وبدلالة القوة الدافعة الكهربائية العكسية للخلية تأخذ الكفاءة المعرفة بالمعادلة (٥-٨) الصورة:

$$\xi_n = \frac{- ن ق ف}{\Delta ل} = \frac{- ت ز ف}{\Delta ل} \quad (٦-٨)$$

حيث ت هي التيار، ز الزمن الذى يسرى التيار خلاله.

ولخلية وقود تحت حمل خارجى ستهبط القوة الدافعة الكهربائية الحقيقية (التي تدفع بالإلكترونات عبر الدائرة الخارجية) عن القيمة ف إلى قيمة أقل ف ح

$$\text{وتعطى الكفاءة الحقيقية بالمعادلة } \xi_{ح} = \frac{- ن ق ف ح}{\Delta ل} \quad (٧-٨)$$

وهناك صيغة أخرى للكفاءة نحصل عليها بقسمة المعادلة (٧-٨) على المعادلة (٦-٨)

(٨-٨)

$$\eta_f = \frac{f}{f_c}$$

وتقل هذه النسبة بزيادة كثافة التيار.

وهناك صيغة أخرى للكفاءة تستعمل، هي الجزء الكهروميكانيكي من التفاعل الذى يولد التيار، ويطلق عليها (كفاءة فاراداي) أو الكفاءة التيارية  $\eta_f$ ، ويمكن أن يعبر عنها بدلالة عدد المولات الإجمالى من الوقود التى تتفاعل كهروميكانيكياً فى الثانية الواحدة.

### العوامل التى تحد من أداء خلية الوقود:

القابلية للتفاعل، وثبات الخواص هما المتطلبان المشتركان لكل خلايا الوقود، ولتحقيق متطلب القابلية للتفاعل يلزم أن تتوفر لدينا حسابات دقيقة للمواد المتفاعلة والنتيجة من التفاعل، كما يلزم توفر فاعلية عالية للأقطاب بما يكفل تولد تيار ذى كثافة عالية، وهذان الشرطان اللازمان لقابلية التفاعل يتحكم فيهما إلى حد كبير معدلات التفاعلات لدى القطبين وآلياتهما، وحتى وقتنا الراهن تعالج مسألة تنشيط قابلية التفاعل باستعمال أقطاب مسامية من أجل زيادة المساحة البينية ما بين الغاز والقطب والمحلول الكهربى، وذلك بزيادة الضغط ورفع درجة الحرارة أو باستخدام عوامل كيميائية مساعدة.

و يعنى المتطلب الثانى (الثبات أو الصمود) أن تكون خلية الوقود فقط مجرد محول للطاقة، وأن تبقى - على عكس الحال مع البطارية التقليدية - بدون تغيرات خلال عمر خدمتها، ويستوجب هذا المتطلب عدم حدوث أى تآكل كيميائى أو تفاعلات جانبية، ولا أى تغيير فى المحلول الكهربى أو الأقطاب.

ويرتبط متطلباً فعالية التفاعل وثبات الصفات ببعضهما البعض، فزيادة درجة الحرارة لتحسين نشاط التفاعل، قد تشترك الأقطاب فى تفاعلات الخلية، ومن ثم تفقد هذه الأقطاب خاصية الثبات، وإذا ما شغلت خلية الوقود فى درجة حرارة

مقاربة لدرجة الغرفة فقد تحافظ الخلية على ثبات صفاتها، إلا أنها لن تمنحنا من الكهرباء إلا القليل.

وترجع الفوائد الحادثة لدى الأقطاب بصفة عامة إلى صورة ما من الاستقطاب، ويعنى الاستقطاب الفرق ما بين فرق الجهد لقطب معين، وفرق الجهد التجريبي عندما يسحب تيار ما من الخلية، ويمكن تصنيف فوائد الأقطاب إلى ثلاث فئات:

١ - استقطاب كيميائي.

٢ - استقطاب تركزي.

٣ - استقطاب مقاومي.

الاستقطاب الكيميائي:

هو ظاهرة تبدو على السطح، يتوقف مقدارها - جزئياً - على الكيفية التي تتدفق بها الأيونات عند الأقطاب، وجزئياً على معدل هذا التدفق.

استقطاب خلال التركيز:

هناك في الخلية الكهروكيميائية فاقد في الجهد، نتيجة عدم قدرة المادة المحيطة على الحفاظ على درجة التركيز الابتدائية للمائع بعد أن يبدأ التيار في السريان، والنوع الأول من الاستقطاب مع اختلاف التركيز هو هبوط في فرق الجهد نتيجة التغير في تركيز المحلول الكهربى بالقرب من القطب في أثناء التفاعل، والنوع الثانى من استقطاب تغير التركيز هو ذلك الناشئ عن التغيرات في تركيز الغازات الداخلة في التفاعل في المحيط الملاصق لمنطقة التفاعل من القطب.

### الاستقطاب نتيجة (وجود) المقاومة (الكهربية):

عندما يحدث تفاعل كهروكيميائي عند القطب يقع عموماً تغير ملموس فى معامل التوصيل النوعى للمحلول الكهربى، وهو ما يؤدى إلى فقد إضافى فى فرق الجهد، وعندما يوصل الحمل بخلية وقود ويسحب منها تياراً تهبط الفولتية التى نحصل عليها من القيمة النظرية ف إلى قيمة أقل ف ح.

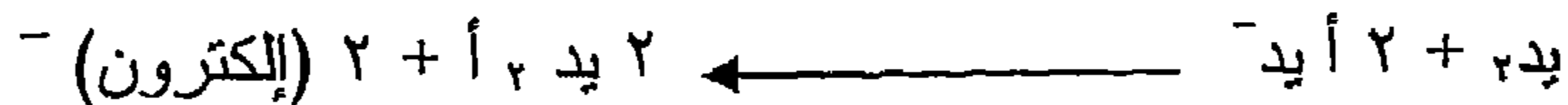
قيمة الفولت الصافى = الفولتية النظرية ف - الهبوط فى الفولتية نتيجة استقطاب التركيز لدى المهبط - الفاقد نتيجة الاستقطاب الكيميائى لدى المهبط - الفاقد نتيجة استقطاب التركيز لدى المصعد - الفاقد نتيجة الاستقطاب الكيميائى لدى المصعد.

### أنواع خلايا الوقود المختلفة:

يجرى اليوم تطوير عدد كبير من أنواع خلايا الوقود المختلفة، وقد وصلت بعض عمليات التطوير هذه إلى مراحل متقدمة فى حين أنها لم تتخط فى غيرها بعد مرحلة التجريب المعملى، ونستعرض فيما يلى بعضاً منها مما يمثل نماذج من تلك الأنواع العديدة.

### الخلية الهيدروجينية - الأكسجينية:

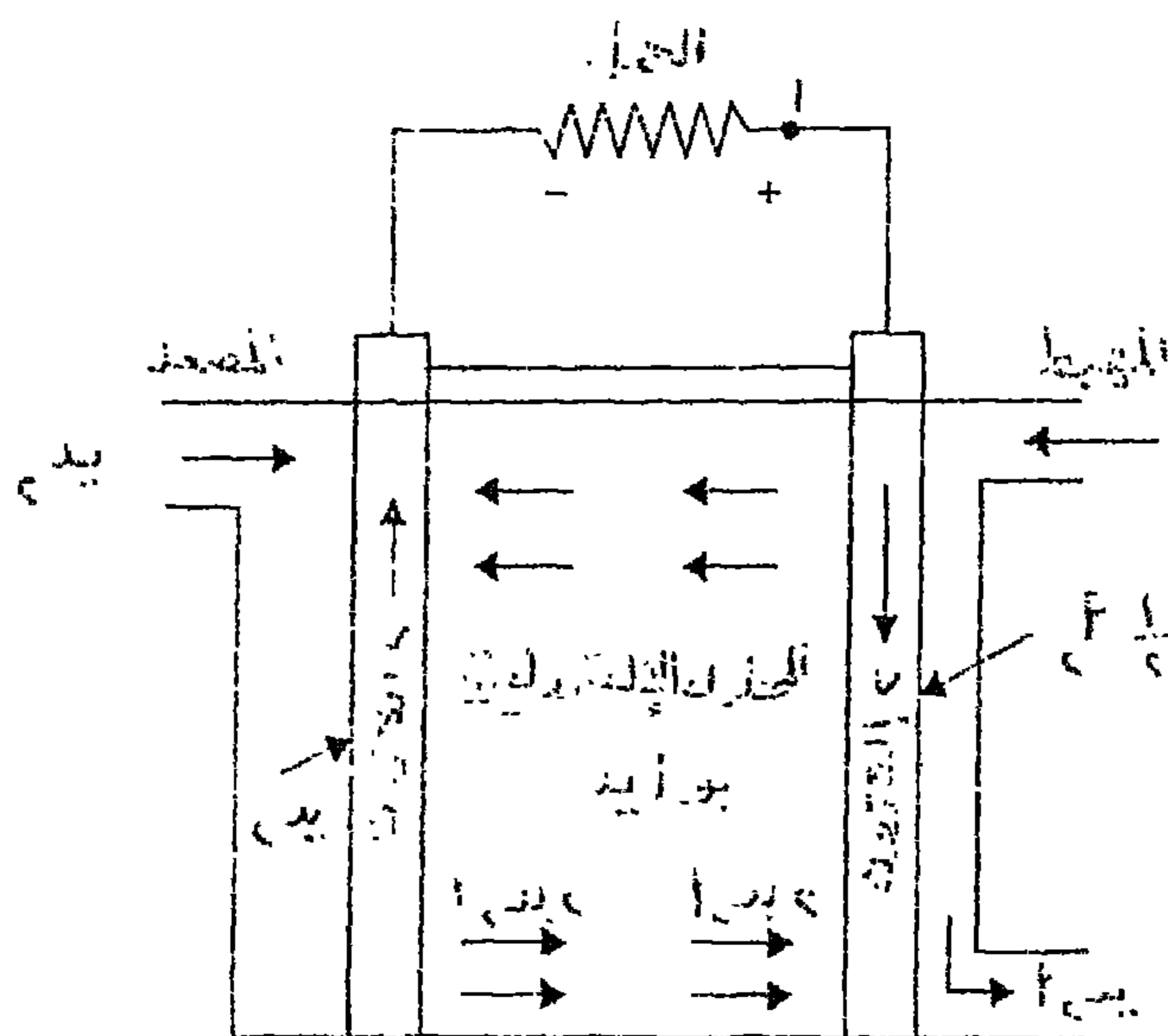
يصور شكل (٨ - ٣) رسماً تخطيطياً لخلية وقود هيدروجينية - أكسجينية، ويلزم فيها قطبان مساميان يكفلان تلامس الغازات المتفاعلة مع محلول التحليل الكهربى (هيدروكسيد البوتاسيوم)، ويحدث لدى القطبين تبادل إلكترونى يؤدى إلى سريان تيار فى الحمل الخارجى، إذ يتحد الهيدروجين (مادة الوقود) مع أيونات الهيدروكسيد من المحلول عند المصعد.



وتنتقل الإلكترونات عبر التيار الخارجى إلى المهبط حيث تتفاعل مع الأكسجين (العامل المؤكسد).



والنتيجة المحصلة من التفاعلين هي جزيء من الماء:



شكل (٨ - ٣)

### تصوير تخطيطي لخلية الوقود الهيدروجينية - الأكسجينية

يختلف التفاعل في خلية الوقود عن الاحتراق، فالأكسدة فيها تعنى انتقال إلكترون عبر دائرة خارجية، وبذلك فإن جزءاً محسوساً من طاقة التفاعل يحصل عليه في صورة طاقة كهربائية، والبقية في صورة حرارة.



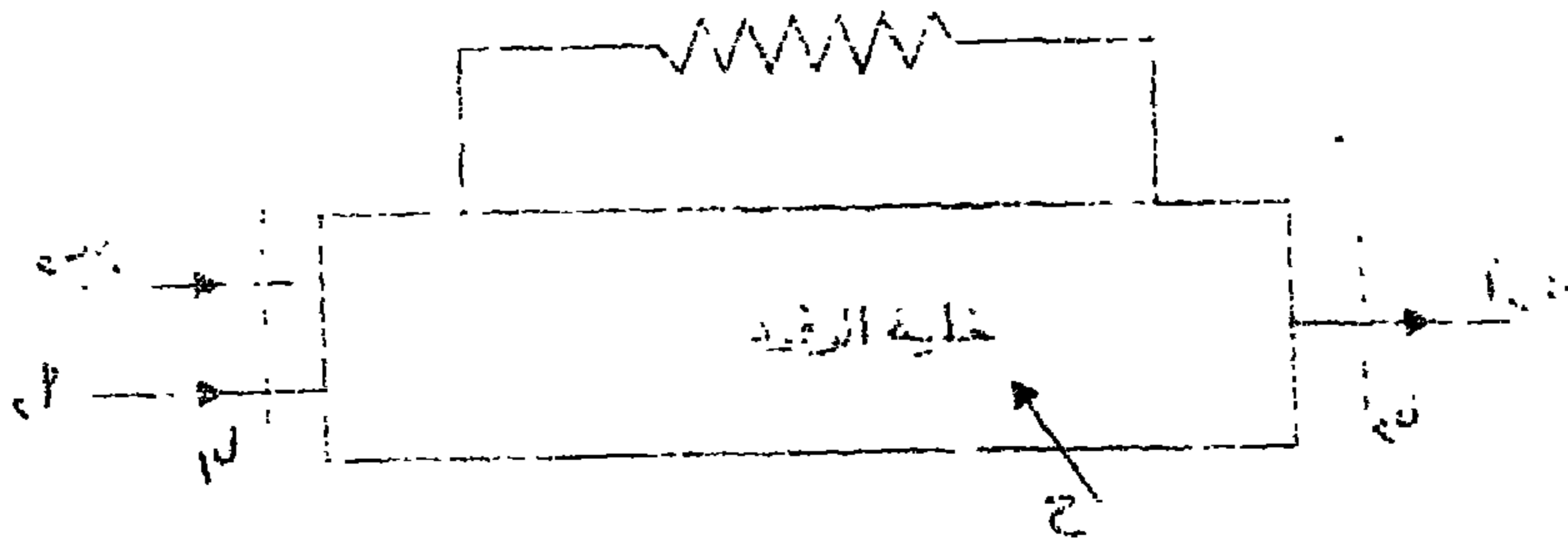
ولما كان كل جزيء من غاز الهيدروجين يؤدي إلى انتقال شحنتين من الإلكترونات، فإن مقدار الشحنة المنتقلة من كيلو جرام مول من الغاز يمكن تقديره بضرب شحنة الإلكترونين بعدد أفوجادرو:

$$2 \times \text{شحنة الإلكترون} \times \text{عدد أفوجادرو} = 1.93 \times 10^8 \text{ كولوم}$$

وينظر هذا المقدار تياراً قميته ١ أمبير يسرى لمدة  $1.93 \times 10^8$  ثانية، ويتوقف مقدار الطاقة الكهربائية المستفاد منها في الحمل الخارجى لكل كيلو جرام مول من الهيدروجين على فرق الجهد المتحصل عليه ف:

$$\text{الطاقة المستفادة} = \text{ش. ف}$$

ويمكننا اعتبار خلية الوقود بمثابة عملية سريان منتظمة حصيلتها من الشغل المفيد فى صورة طاقة كهربية (شكل ٨ - ٤):



شكل (٨ - ٤)

عملية السريان المنتظم فى خلية وقود

وترتبط محصلة الشغل المنتج ش وكمية الحرارة المدخلة ح بإنثالبي المواد المتفاعلة  $L_1$  وإنثالبي نواتج التفاعل  $L_2$ :

$$L_1 + \text{ش} = L_2 + \text{ح}$$

$$\text{ش} = L_2 - L_1 + \text{ح}$$

وفى خلية الوقود الهيدروجينية - الأكسجينية، تكون إشارة (ح) أى الحرارة الناجمة عن التفاعل سالبة، وعلى ذلك فالطاقة الكهربائية أقل من الطاقة الحرارية الناتجة عن عملية الاحتراق المعتادة التى ينعدم فيها مقدار الشغل الميكانيكى بمقدار الفرق فى الإنثالپيا (ل - ١ل - ٢ل).

ويمكن حساب الطاقة الكهربائية التى تنتجها الخلية من خلال خاصية ثرموديناميكية أخرى للمواد الداخلة فى التفاعل، وهى دالة جيبس Gibbs function، وفى عملية انعكاسية ثابتة درجة الحرارة وتحت ضغط ثابت يعادل الشغل مقدار التغير فى دالة جيبس، ويعطينا ذلك (عند درجة ٢٥ °م):

$$\text{ش} = \text{ج} - \text{ج} = ٢ \text{ج} - ١ \text{ج} = ١٠ \times ٥٦,٧ \text{ سع حرارى / كجم مول من الهيدروجين}$$

$$= ١٠ \times ٢,٣٧ \text{ جول / كجم مول من الهيدروجين.}$$

ويمكن الحصول على فرق جهد الخلية من الطاقة الكهربائية:

$$\text{ف} = \frac{\text{ش}}{\text{ش}} = ١,٢٣ \text{ فولت}$$

وفرق الجهد (ف) هو فولتية الدائرة المفتوحة التى تم حسابها بإهمال الفواقد فى مقاومة الأقطاب واستقطاب المحلول الكهربى ونضوب المحلول الكهربى عند الأقطاب.

ويمكن مقارنة أقصى طاقة كهربية يمكن مقارنتها بطاقة الاحتراق (ل - ١ل - ٢ل).

$$\text{ل} - \text{ل} = ٢ \text{ل} - ١ \text{ل} = ١٠ \times ٦٨,٣ \text{ سع حرارى / كجم مول من الهيدروجين.}$$

$$= ١٠ \times ٢,٣٦ (*) \text{ جول / كجم مول من الهيدروجين.}$$

---

(\*) الرقم كما ورد فى الأصل المترجم وصحته ٢,٨٥ (المترجم)

وأقصى قيمة لكفاءة الخلية =  $\frac{\text{ش}}{J_1 - J_2}$

عُ القصوى =  $\frac{\text{ش}}{J_1 - J_2} = 0.83$

وعلى ذلك تصل القيمة القصوى لكفاءة خلية الوقود ٨٣%.

### الخلايا الكيميائية الحيوية Biochemical Cells:

فى الخلية الكيميائية الحيوية تحسن التفاعلات عند أحد القطبين أو كليهما عن طريق عملية حيوية، وتصنف الخلايا الكيميائية الحيوية تقليدياً إلى طائفتين رئيسيتين:

(١) خلايا غير مباشرة يتحول فيها الوقود الذى يغذى الكيان الحيوى إلى منتج فاقد يمكن جمعه واستغلاله فى خلية وقود مستقلة منفصلة.

(٢) وفى الخلية المباشرة قد ينمو الكيان الحيوى بجوار القطب، ويستغل الفاقد الذى ينتجه خلال تحوله الحيوى metabolism (الأمونيا - الإيثانول - الهيدروجين وما إلى ذلك) رأساً فى إنتاج الكهرباء.

وفى الخلايا غير المباشرة يستهلك الكيان الحيوى نفسه جزءاً كبيراً من الطاقة، ومن هنا فلا يرجح أن تثبت مثل هذه الخلايا كفاءة عالية فى تحويل الطاقة، كما يواجه استعمال الخلايا الحيوية من النوع المباشر مشكلة توفير الظروف المواتية لنمو الكيان الحيوى.

### الخلايا المتوالدة التجديدية:

فى خلايا الوقود التجديدية، يعاد تجديد (توليد) المواد الداخلة فى التفاعل من نواتجه، ومن ثم يعاد تدويرها، ويمكن أن ترتب عملية التجديد هذه بحيث تتم داخل خلية الوقود أو خارجها.

وهناك عدد من الطرق للتجديد المتاحة - على الأقل من الناحية النظرية، وتشمل:

١ - الطريقة الحرارية.

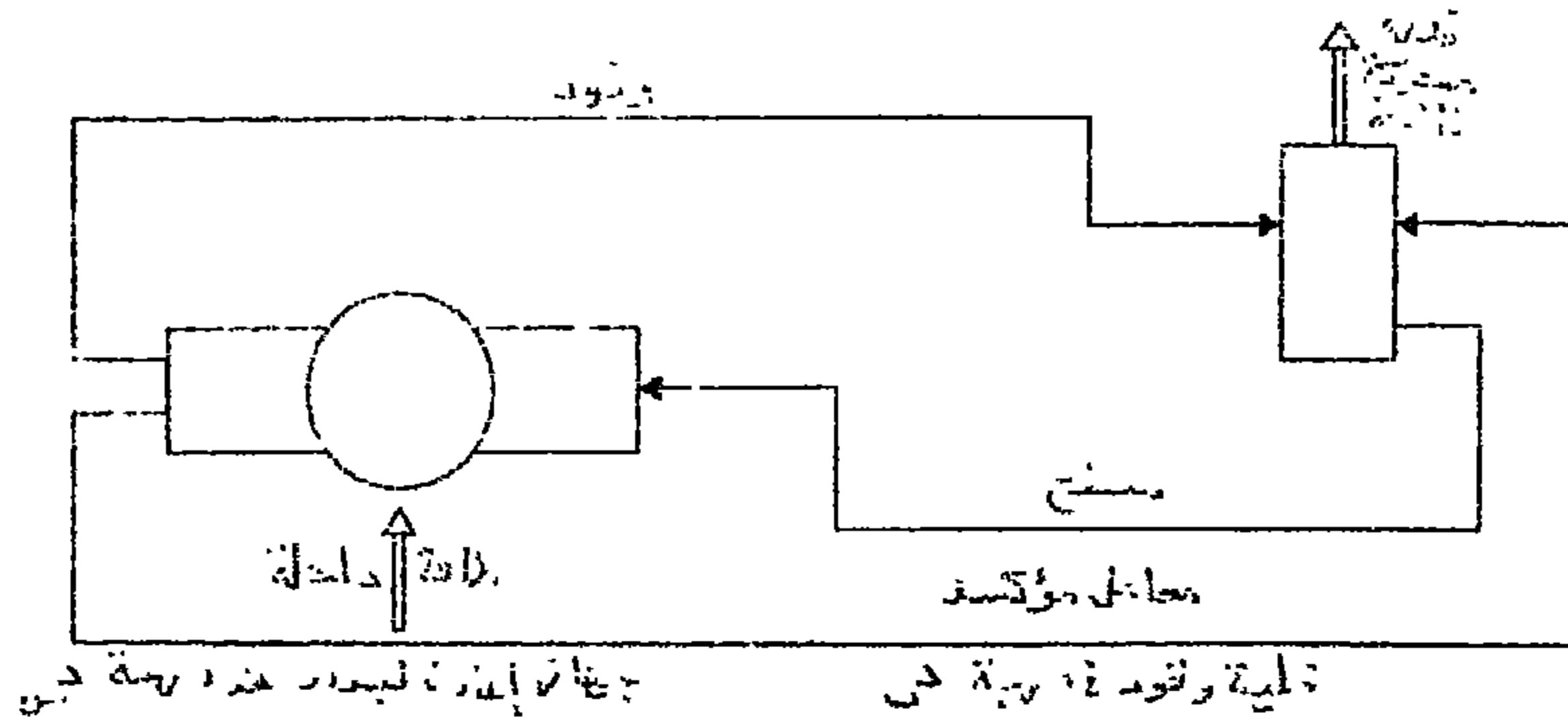
٢ - الطريقة الكهربائية.

٣ - الطريقة الكيميائية.

٤ - طريقة النشاط الإشعاعي.

٥ - الطريقة الضوئية الكيميائية.

ويصور شكل (٨ - ٥) مخططاً عاماً لخلية تجديدية.



شكل (٨ - ٥)

رسم تخطيطي عام لخلية وقود تجديدية

وفي خلية تجديدية حرارية يتفاعل الوقود هـ مع العامل المؤكسد عند درجة د ب، ليكون منتجاً هـ ويفرز هذا التفاعل طاقة كهربائية، ويعاد ناتج التفاعل إلى جهاز إعادة تجديد regenerator حيث يتحلل مرة أخرى إلى المواد الداخلة في التفاعل عند درجة حرارة أعلى د س، وتحت هذه الظروف يمكن أن ينظر إلى النواتج كالمائع الوسيط (الشغال) في دورة حرارية تتحول فيها الحرارة إلى شغل

كهربى ومن ثم فهى عرضة للعوامل التى تحد من الكفاءة فى دورة كارنو وهذه العوامل تنطبق حتى لو تعرض المائع الوسيط للتحلل ثم العودة ثانية للاتحاد، ورغم أن خلية الوقود نفسها مستثناة من العوامل التى تحد من كفاءة دورة كارنو، فالاتحاد الكيميائى لا يخضع لهذا الاستثناء. وفيما يلى بعض الأرقام المستخلصة من البحوث على الخلايا التجديدية من النوع الحرارى.

(١) الخلايا التجديدية من النوع الحرارى ذات كفاءة متوسطة (من ٥ إلى ٢٠%)، وثبت أن عمرها يمتد حتى ١٢٠٠٠ ساعة.

(٢) فى المنظومات التى تبرد بالهواء يعتمد حجم جهاز التجديد فى المقام الأول على معامل انتقال الحرارة من المكثف إلى الهواء.

ومن المعقول أن نجد أن المنظومات المتكاملة التجديدية من النوع الحرارى ذات السعة التى تتراوح ما بين ١، ١٠ كيلو وات سيكون لها ساعات قدرة نوعية  $10^{-2}$  كيلو وات/كجم تقريباً.

**الباب التاسع**

**المولدات الأيونية الحرارية والكهروحرارية**



## المولدات الأيونية الحرارية:

### مقدمة:

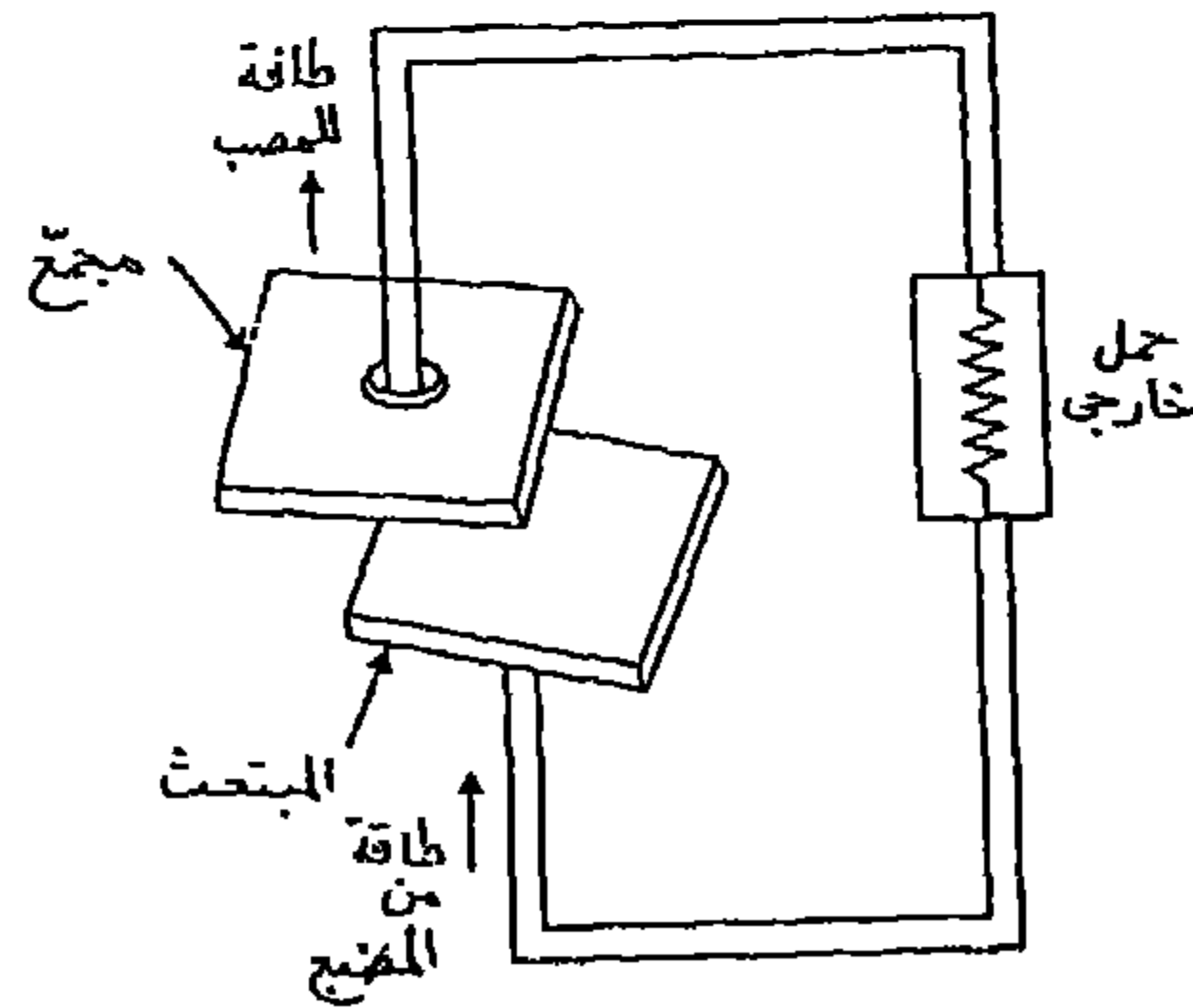
قبل أكثر من مائتي عام رصد دى فاي Du Fay، أن الفضاء على مقربة من جسم ساخن لدرجة الاحمرار، هو وسط موصل للكهرباء، وفي ١٨٥٣ نشر إدموند بيكيريل Edmond Becquerel ملحوظة له عن أن جهداً قدره بضعة فولتات فقط كان كافياً لدفع تيار يمكن قياسه بجهاز جلفانومتر عبر الهواء الساخن بين قطبين بلاتينيين، إلى درجة حرارة تناظر درجة الاحمرار، وبين عام ١٨٨٢، ١٨٨٩ أجرى إيلستر وجيتل Elster and Geitel تجاربهما على جهاز محكم يحتوى على إلكترودين، وأرسيا تلك القاعدة أنه عند درجات الحرارة المنخفضة نسبياً، يمر التيار الكهربى بسهولة أكثر إذا شحنت الفتيلة الساخنة بشحنة موجبة، وأشار توماس ألفا أديسون Thomas Alva Edison، سنة ١٨٨٣ إلى أنه رصد فى وقت مبكر الانبعاث الأيونى الحرارى، وقد تعرف ج. ج. تومسون J.J. Thomson فى ١٨٩٩ على طبيعة حاملات الشحنة، بقياس النسبة بين شحنتها وكتلتها، وبين أنه - داخل نطاق حدود اللايقين المتعارف عليه فى التجارب العلمية، تعود هذه القيمة إلى الإلكترونات، ومع حلول عام ١٩٣٣ حقق لانجموير Langmuir استيعاباً كافياً للظاهرة يمكن من بناء أنواع عديدة من المحولات الترميونية.

## المبادئ الفيزيائية الأساسية للمحول الترميوني:

يتركب محول الطاقة الترميوني من سطحين لقطبيين، يحتفظ بأحدهما (ويطلق عليه الباعث أو المبتعث emitter) فى درجة حرارة عالية، فى حين يبقى القطب الآخر أو المسمى بالمجمع (collector) عند درجة حرارة أقل، ويفصل

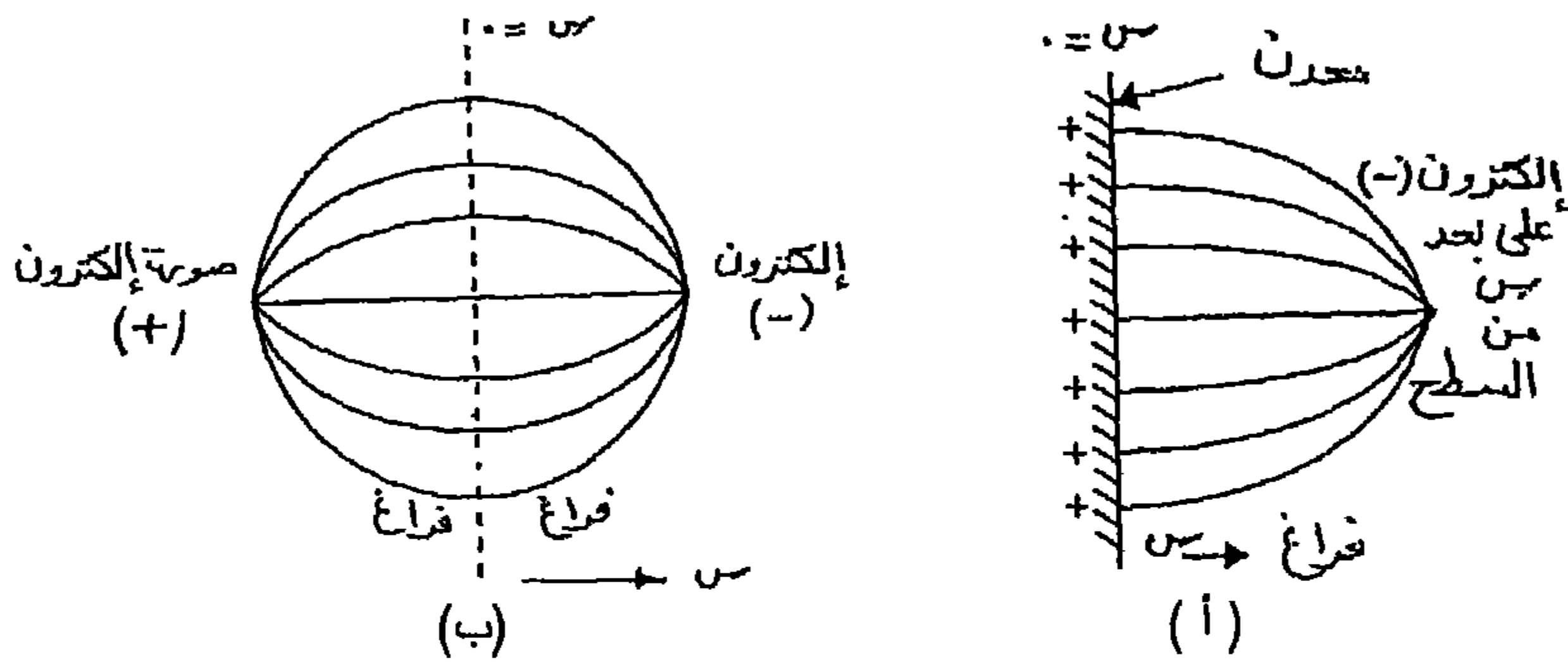


بينهما إما فراغ أو بلازما (انظر شكل ٩ - ١)، وتكتسب الإلكترونات في المبتعث طاقة حرارية تكفى لها لى تتحرك فى نوع من الحركة العشوائية التزاحمية التى تشجع بعضاً منها على أن تفلت من سطح المبتعث، وتدف إلى المجمع، ثم تعود إلى المبتعث عبر حمل خارجى، ومن ثم تولد قدرة كهربائية، وفى كل خطوة من الخطوات التى سلف شرحها تبرز تعقيدات تعيق انتقال الإلكترونات، وستعالج هذه المسائل بالتفصيل عند دراسة وظيفة عمل القطبين والتحكم فى شحنة الفراغ.



شكل (٩ - ١)

رسم تخطيطى لمحول ثرميونى يعمل كآلة حرارية



شكل (٩ - ٢)

أ - خطوط المجال الكهربى لإلكترون على مقربة من سطح المعدن  
ب - خطوط المجال الكهربى لصورة شحنة إلكترون موجبة +،  
ولإلكترون - على مسافتين متساويتين من الخط س = .

### دالة الشغل Work Function:

يمكن النظر إلى تركيب القطب (الإلكتروود) على أنه ذرات مرتبة في نسق هندسى (يسمى بالتشبيكة الذرية Lattice) بحيث تتذبذب حول مركز اتزانها، والإلكترونات التى تدور فى أقصى المدارات الخارجية للذرة لا تقيد بها إلى ذرتها الأم إلا قوة ضعيفة، ومن ثم فقد تغادر مدارها الأصلي للدخول فى مدار آخر حول نواة أخرى.

وعلى ذلك فالإلكترونات آخر المدارات من الخارج لا تنتمى إلى ذرة بعينها، ومن هنا تسمى بالإلكترونات الحرة، وحينما تفقد ذرة ما واحداً من إلكتروناتها فإنها تكتسب شحنة موجبة، وبالتالي فالقطب (الإلكتروود) مكون من ذرات موجبة الشحنة، وفى درجة الصفر المطلق من شأن الطاقة الحركية للإلكترونات الحرة أن تقع فى نطاق حالات كمومية من الصفر وحتى قيمة عظمى هى التى يطلق عليها مستوى أو منسوب فيرمى Fermi level.

ومن المفترض أن الإلكترونات الحرة محتبسة فى المعدن عن طريق قوى التجاذب بين شحنتين مختلفتى الإشارة.

ويمكن حساب مقدار قوة التجاذب هذه باستعمال أسلوب انعكاس الصور على المرايا فالمجال إلى اليمين من المستقيم س = صفراً متماثل فى شكل ( ٩ - ٢ أ )، ( ٩ - ٢ ب )، ومن ثم فالقوة المؤثرة على إلكترون على مبعده (س) من السطح هى كما لو كان سطح المعدن قد استبدل به شحنة موجبة مقدارها (أ) على مسافة ( - س ) وعلى ذلك فالقوة المؤثرة على الإلكترون تساوى  $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 s^2}$  ، والطاقة اللازمة للتغلب على هذه القوة هى ما يسمى بشغل السطح أو دالة الشغل work function.

وللأقطاب في محول الطاقة الثرميونى مستويات فيرمى مختلفة، فالمبتعث مستوى فيرمى منخفض فى حين يكون المجمع فى مستوى فيرمى مرتفع نسبياً، ومن هنا فإذا ما ارتفع إلكترون بالمبتعث بعيداً عن سطحه فسيحتاج إلى مقدار أعلى من الطاقة أكثر مما يحتاجه إلكترون مناظر له كى يرتفع عن سطح المجمع، ومن ثم فدالة الشغل للمبتعث أعلى من دالة شغل المجمع.

فإذا سلط ما يكفى من الحرارة من مصدر ذى حرارة مرتفعة على المبتعث، فستكسب بعض إلكتروناته الحرارة عالية الطاقة لدى منسوب فيرمى، طاقة تمكنها من الإفلات من سطح المبتعث، وبعبارة أخرى ستكسب طاقة مساوية لدالة شغل المبتعث، علاوة على بعض الفائض فى طاقة الحركة، وفى الحالة المثلى ستعبر الإلكترونات الفجوة ما بين المبتعث والمجمع دونما بذل لأية طاقة، وعندما ترتطم الإلكترونات بالمجمع، ستطلق طاقتها الحركية علاوة على طاقة تعادل دالة شغل المجمع، حيث يلزم مقدار من الطاقة يساوى دالة شغل المجمع للإلكترون لكى يتمكن من المرور خلال سطح المجمع، وينبغى أن تلفظ هذه الطاقة فى صورة حرارة من المجمع ذى درجة الحرارة المنخفضة، وإذ يصل الإلكترون إلى مستوى طاقة فيرمى الخاص بالمجمع، فإنه يكون ذا طاقة أعلى من إلكترون فى مستوى طاقة فيرمى الخاص بالمبتعث، وهذا المستوى الأعلى من الطاقة يمكن استغلاله بإمراره خلال حمل خارجى وتشغيله.

### التحكم فى شحنة الفراغ:

تمثل الإلكترونات دور المائع الوسيط الذى يعمل فى المحول الثرميونى، وتولد الإلكترونات شحنة فى الفراغ فى المنطقة ما بين المبتعث والمجمع، وما لم تتخذ إجراءات للحد من تعاظم قيمة هذه الشحنة فإنها ستؤدى بشدة إلى الحد من

كفاءة المحول الترميوني، ومن شأن إدخال أيونات موجبة في الفراغ ما بين القطبين أن يحد من شحنة الفراغ هذه ويهبط بها إلى القيمة المرغوبة، وأن يتيح وجود تنويعات من توزيعات فرق الجهد، والعوامل التي تزيد من تعقيد هذه الظاهرة هي تأين السطح، وتبعثر الإلكترونات، وطبقات السطح الممتصة، والآن فلنأخذ السيزيوم، والذي يمثل أعلى المواد الوسيطة قدرة على تحييد سحابة الإلكترونات وأوسع هذه المواد انتشاراً.

فحينما يرتفع ضغط السيزيوم في مولد ترميوني بينما يحتفظ بدرجة حرارة المبتعث ثابتة، فإن تيار الأيونات المنبعثة سيزداد في تناسب طردي في البداية، وعندما يبدأ امتصاص السيزيوم على السطح - على أية حال - سيبطئ التناقص المناظر في دالة شغل السطح، من معدل زيادة انبعاث الأيونات، وفي واقع الحال، بتوالي ازدياد الضغط ستبلغ الأمور نقطة قد يؤدي زيادة ضغط السيزيوم عندها إلى نقص في انبعاث الأيونات.

وعلى الجانب الآخر سوف يزداد - بصفة عامة - انبعاث الإلكترونات بازدياد ضغط السيزيوم، وهناك قيمة لضغط السيزيوم تنتج مقداراً من الأيونات يكفي بالكاد (لتحييد) شحنة الفراغ، ودالة شغل السطح المناظرة لقيمة الضغط هذه ( $\phi$ ) تسمى بدالة الشغل المحيدة **neutralization work function**.

وقيمة دالة الشغل المحيدة لمعدن معين، هي دالة - وإن بارتباط ضعيف - بدرجة حرارة السطح، ونظراً لضيق نطاق درجات حرارة المبتعث التي تستخدم فعلياً في المحولات الترميونية (من ١٢٠٠ إلى ١٨٠٠ °م) فإن قيمة مفردة للدالة  $\phi$  لكل معدن تعد مؤدية للغرض من الناحية العملية.

وبالنظر إلى طبيعة حالة الغاز المتأين فيما بين القطبين، طرح هيمكويست Hemquist ثلاثة أوضاع أساسية لتشغيل المحولات الترميونية التي تعمل ببخار السيزيوم:

- (١) وضع البلازما: ويتسم هذا الوضع بضغط منخفض للسيزيوم ودرجات حرارة عالية للمبتعث، وينتج عن هذا الوضع مبتعث خال من السيزيوم.
- (٢) وضع الضغط العالي: وفي هذه الحالة قد يصل ضغط السيزيوم إلى بضعة ملليمترات من الزئبق (أو تور Torr) ويسبب هذا تغطى سطح المبتعث بالسيزيوم، مما يستدعى وجود مسافة صغيرة ما بين القطبين للحد من الفاقد الناجم عن تصادمات الإلكترونات.
- (٣) وضع القوس arc: ويحدث عند درجة حرارة أقل مما فى وضع الضغط العالي.

### مواد تصنيع المحول الترميوني:

أهم الخواص اللازمة فى مادة لتصنيع مبتعث جيد هى:

- (١) قدرة كبيرة على بث الإلكترونات، مقترنة بمعدل اضمحلال بطيء فى هذه القدرة.
  - (٢) معامل انبعاث منخفض للتقليل من الفاقد الحرارى بالإشعاع من المبتعث.
  - (٣) يجب أن تختار مادة لا تغير من خواص المجمع، إذا ما حدث أن تبخرت هذه المادة ثم تكثفت بعد ذلك على المجمع، فمن شأن تغير الخواص أن يقلل من فاعلية المجمع.
- ويوضح الجدول رقم (٩ - ١) القيمة التقريبية لدالة الشغل لبعض المواد التى يشيع استخدامها فى عمل المبتعثات.

جدول ( ٩ - ١ )

القيم التقريبية لدالة الشغل المحيدة

المادة	قيمة $\theta$ بالفولت
التنجستين متعدد البلورات	٢,٦٥
الرينيوم (*) متعدد البلورات	٢,٨٠
النيوبيوم متعدد البلورات	٢,٥٥

والفيصل الرئيسى فى اختيار مادة المجمع هو أن تكون ذات دالة شغل منخفضة بقدر الإمكان، ولأن درجة حرارة المجمع تحفظ عند حد أدنى من درجة الحرارة التى تتسبب فى انبعاث محسوس من الإلكترونات فإن خواصها الابطعائية الحقيقية لا يترتب عليها أية تداعيات، وعلى أية حال فكلما انخفضت قيمة دالة شغل المجمع، قلت الطاقة التى على الإلكترون أن ينبذها لدى تغلغله فى سطح المجمع، ومن الناحية العملية يصل الحد الأدنى لدالة شغل المجمع  $\theta$  بحيث يبقى مستقرًا، إلى زهاء ١,٥ إلكترون فولت، ولمجمع درجة حرارته ١٢٧٣ على مقياس كلفن تبلغ القيمة المثلى للمقدار  $\theta$  نحو ١,٦ إلكترون فولت، وقد شاع استخدام الموليبدنم فى عمل المجمعات، وتقدر قيمة دالة شغله بزهاء ١,٧ إلكترون فولت.

---

(\*) عنصر وزنه الذرى ١٨٦,٣١ يغلّى عند درجة ٥٥٣٠ °م رباعى وسباعى التكافؤ وله سبعة نظائر (المترجم)

## المولدات الكهروحرارية:

### مقدمة:

هناك حاجة ملحة إلى محول طاقة قليل الضجيج، ذي اعتمادية عالية ولا يحتوى على أجزاء متحركة، لتحويل الحرارة إلى قدرة كهربية، وقد قاد ذلك المهندسين إلى أن ينظروا بعين الاعتبار إلى مجموعة من الظواهر تسمى بالتأثيرات الكهروحرارية، إن هذه الظواهر التي تم التعرف عليها منذ مئات السنين قد أفضت إلى إتاحة الفرصة لتطوير مصدر للقدرة الكهربائية، صغير ومستقل بذاته.

لقد أتم التنكيرش Altenkirch الصياغة الرئيسية لنظرية المولدات الكهروحرارية في صورتها المرضية عامى ١٩٠٩، ١٩١١، وقد وضحت أبحاثه الحاجة إلى مواد لها معامل سيبك <sup>(\*)</sup>scebeck وتوصيلية كهربية مرتفعان لتقليل الحرارة المفقودة، ولها توصيلية حرارية منخفضة لتقليل تسرب الحرارة خلال الجهاز، ورغم أن التنكيرش قد حدد الخواص المرغوبة في المواد التي يجب أن تستعمل في الأجهزة الكهروحرارية، فقد انقضت خمسون سنة قبل أن تعرف تلك المواد وتنتشر بوفرة، وذلك فور أن بدأ استخدام أشباه الموصلات، تلك الثورة التقنية في خمسينيات القرن العشرين، والتي أعادت - على نحو ما - اكتشاف الكهرباء الحرارية ووضعتها موضع التطبيق في عدد من الاستعمالات الطريفة.

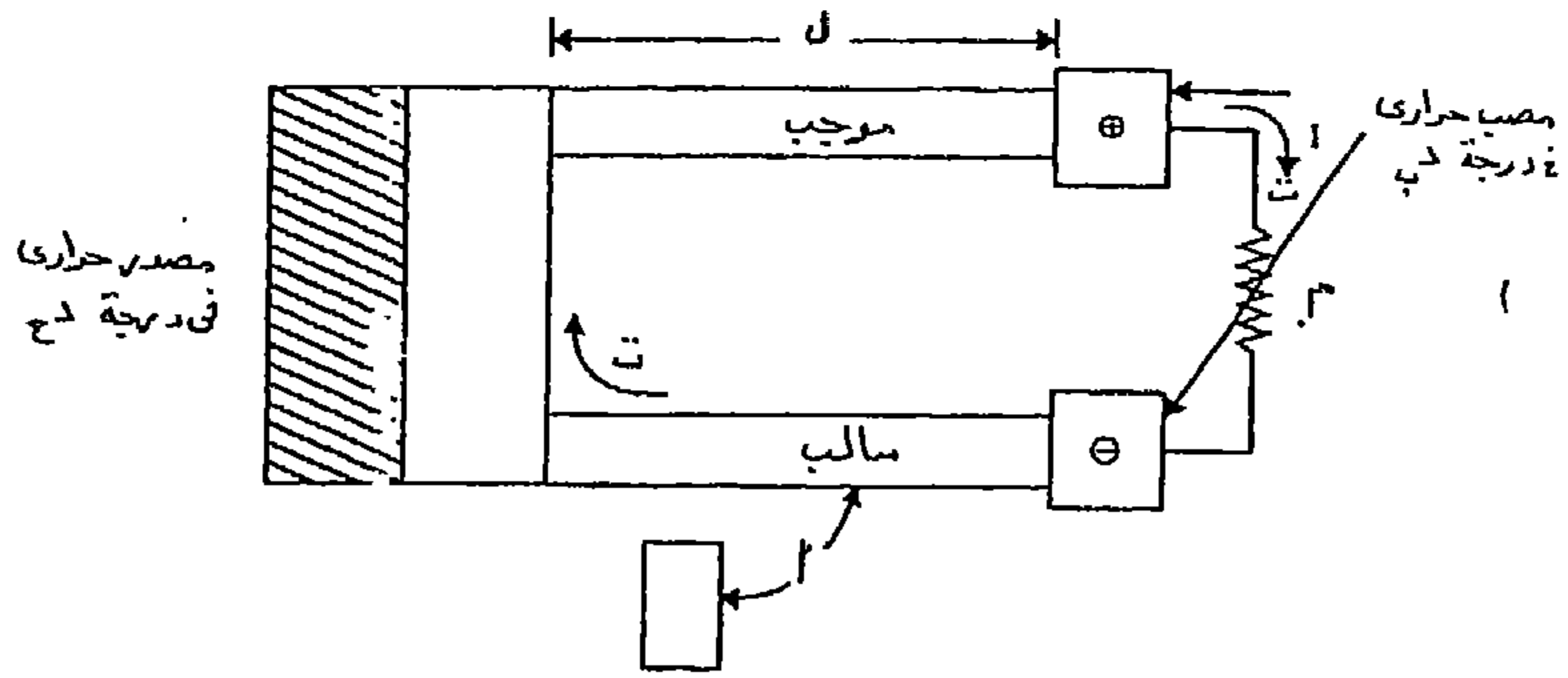
---

(\*) معامل سيبك هو مقدار التغير في القوة الدافعة الكهربائية مع درجة الحرارة أو هو فولتية الدائرة المفتوحة بين نقطتى موصل (المترجم)

## تحليل تكوين المولد الكهروحرارى:

### الافتراضات الأساسية:

لتحليل ظاهرة المولد الكهروحرارى، علينا وضع افتراضات معينة للتبسيط، والتحليل مبنى على أساس النموذج الموضح بشكل (٩-٣).



شكل (٩ - ٣)

### نموذج للمولد الكهروحرارى

ويتكون المولد الكهروحرارى من عنصرين من أشباه الموصلات، أحدهما من مادة من النوع الموجب والآخر من مادة من النوع السالب، وقد افترضت - بغرض التبسيط - الافتراضات الآتية:

(١) المولد يعمل بين درجتى د ج العالية، د ب الباردة، وهما درجتا الحرارة الواقعتان عند الوصلتين بين المواد الفعالة بشبه الموصل، والمستودع الموصلة به هذه المواد.

(٢) ليس هناك انتقال للحرارة بين المستودعات عند درجتى د ج، د ب إلا خلال العناصر الكهروحرارية دونما انتقال حرارى عرضى إلى أذرع الجهاز.



٣) المقاومة الكهربائية لنقطة تلامس الوصلة يمكن إهمالها مقارنة بالمقاومة المركزة في الأذرع.

٤) الأذرع لها مساحة مقطع عرضي ثابتة.

٥) المقاومة النوعية الكهربائية  $(e) \text{ resistivity}$  والتوصيلية الحرارية  $(\lambda)$  ومعامل سيبيك للمادة لا تتغير بتغير درجة الحرارة وغير مرتبطة بها.

٦) مقاومة التلامس الحراري بين المصدر وقضبان التوصيل العمومية (خطوط التوزيع) بين العنصرين الموجب والسالب يمكن - بتحقيق عزل كهربائي جيد - تقليلها، وينطبق نفس الافتراض على مصب الطاقة sink.

### القدرة المنتجة من المولد:

القدرة المنتجة تساوي ببساطة حاصل ضرب مربع التيار (ت) في مقاومة الحمل الكهربائية م.

$$P = I^2 R$$

و فرق الجهد للدائرة المفتوحة  $\Delta \alpha$ ، حيث  $\alpha$  هي معامل سيبيك المحصل للوصلة.

$$\alpha = |\alpha_{\text{موجب}}| + |\alpha_{\text{سالب}}|, \Delta \alpha = d - c$$

وعلى ذلك فشدّة التيار المسحوب من المولد  $I = \Delta \alpha / (R + m)$ .

(٩-٢)

$$\text{حيث } m = \frac{\rho_{\text{س}}}{\gamma_{\text{س}}} + \frac{\rho_{\text{ج}}}{\gamma_{\text{ج}}} = \gamma \frac{\text{مساحة المقطع س}}{\text{الطول ل}}$$

ومن المرغوب فيه أحياناً الوصول لأقصى قدرة من المولد، فإذا ما عبرنا عن القدرة المنتجة بدلالة نسبة المقاومة م، واعتبرنا شدة التيار المعطاة بالمعادلة (٩ - ٢) فإننا نحصل على:

$$ق. = (\Delta \alpha) \div (\bar{m} + 1) \quad (3-9)$$

ويمكن الوصول إلى قيمة ق. العظمى وفقا للخطوات المعتادة<sup>(\*)</sup>، وتؤدي هذه الخطوات إلى النتيجة المعروفة، وهي أن قيمة م التي تناظر أعلى قيمة لـ ق. هي الوحدة، أي عندما تكون م = 1

وعند تصميم مولد للحصول على أقصى قدرة، يجتهد المرء للوصول إلى أقل حجم وأقل وزن، أي أقل مقدار من المادة الكهروحرارية، ولتحقيق هذه الأهداف ينبغي الوصول للقدرة القصوى لكل وحدة من المساحة الكلية أي  $\frac{ق.}{س.ك}$ . وبالإضافة إلى ذلك يجب أن يكون طول العنصر أقل ما تسمح به الظروف العملية، إلا أن هناك حدًا أدنى لهذا العامل، إذ أنه بعناصر شديدة القصر، لا تعود مقاومة نقاط التلامس مما يمكن إهماله مقارنة بمقاومة العناصر، ويمكن إيجاد القدرة المنتجة لكل وحدة مساحات من مساحة المقطع بالتعويض بالمقدار (1) لقيمة م في المعادلة (3-9) والقسمة على مساحة العنصرين س س، س ج فنحصل على:

$$\frac{ق.}{ق.ك} = (\Delta \alpha) \div 2 \quad \text{هـ} \quad \left[ \frac{ل.ج}{س.ج} + \frac{ل.س}{س.س} \right] (س.س + س.ج) \quad (4-9)$$

حيث  $س.ك = س.س + س.ج$ ، ولقد افترض أن العنصرين من النوعين السالب والموجب لهما نفس الطول، ويصل المقدار في المعادلة (4-9) لقيمتيه العظمى عندما يصل مقام الكسر إلى حده الأدنى.

وبحساب مشتقة المقام بالتفاضل بالنسبة للمقدار  $\frac{س.س}{س.ج}$ ، نحصل على نسبة المساحة التي تحقق أعلى قيمة في المعادلة (4-9) وهي:

$$\frac{1}{2} \left( \frac{ل.س}{ل.ج} \right) = \frac{س.س}{س.ج} \quad (5-9)$$

---

(\*) يقصد بالخطوات المعتادة إجراء تفاضل للمعادلة بالنسبة للمتغير ومساواة الناتج بالصفر للوصول إلى قيمة المتغير التي تحقق القيمة العظمى (المترجم)



**الباب العاشر**

**طاقة الرياح**



## مقدمة:

طاقة الرياح هي شكل غير مباشر من الطاقة الشمسية، إذ يتحول زهاء ١% من إجمالي الإشعاع الشمسي الذي يصل الأرض - وهو في الجو - إلى طاقة رياح، وتتجم الرياح من الفارق بين سخونة اليابسة والجو المحيط بها بفعل الشمس، وفيما تسخن الشمس أجزاء مختلفة من الأرض وبمعدلات متباينة، يتحرك الهواء من المناطق الباردة إلى المناطق الدافئة مولداً الرياح.

إن الحجم الكلي لهذا المصدر جد ضخم، ويختلف - بمرور الوقت - لدى موضع بعينه.

وطاقة الرياح متجددة، ولا يترتب عليها أى مشاكل ذات بال، وليس من المنطق إهمال المخزون من طاقة الرياح وعدم استغلاله في مختلف التطبيقات في بلاد كالهند، حيث تتاح كميات هائلة من طاقة الرياح، وتشير التقديرات لمخزون طاقة الرياح في الهند إلى رقم يتخطى ٢٠٠٠٠ ميجاوات من القدرة الممكن توليدها، وطبقاً لتقييم حديث، تتبوأ الهند مرتبة عالية للغاية بين الدول النامية، حيث يمثل المخزون من طاقة الرياح خياراً مبشراً بحق.

لذلك، فإن مستقبل طاقة الرياح في الهند ينبغي أن يعد بديلاً اقتصادياً لمصادر القدرة الكهربائية التقليدية.

وخلال العشرين عاماً الماضية<sup>(\*)</sup>، تحقق تقدم بارز في التقنية المستخدمة في تحويل طاقة الرياح إلى طاقة كهربائية، ولقد أدخل أكثر من ١٥٠٠٠ توربين رياح

---

(\*) اعتباراً من عام ٢٠٠٣، عام إصدار هذا الكتاب (المترجم)

فى كاليفورنيا، ٢٨٠٠ توربين رياح فى الدانمارك فى شبكات المرافق، وجرى تشغيلها بطريقة روتينية مع المصادر التقليدية كمحطات الكهرباء المائية، والمحطات العاملة بالوقود الأحفوري، ومحطات التوليد النووية.

وليس هناك من سبب أساسى فى عدم التعامل مع توربينات الرياح كجزء رئيسى فى أية شبكة مرافق حيثما توافرت مصادر رياح جيدة بشرط أن تقوى على منافسة النظم المعتاد عليها من ناحية التكلفة، والاعتمادية والقبول لدى عامة الجمهور، وعلى الرغم من أن تقنية طاقة الرياح تستدعى إيلاء عناية واهتمام إلى التفاصيل العلمية والهندسية، فإنها فى متناول قدرات معظم البلدان - إن لم يكن كلها، وهى تقنية فى سبيلها لأن تكون منافسة اقتصاديًا فى مناطق عديدة حول العالم.

## تقنية طاقة الرياح:

### الاعتبارات الأساسية:

يمكن تقدير طاقة الحركة (ط) لكمية تفاضلية من الهواء حجمها ح (دس) " وكثافتها ث ومتحركة بسرعة ع، حيث ح هى وحدة المساحات فى اتجاه عمودى على اتجاه سريان الرياح، د س مسافة تفاضلية موازية لاتجاه الرياح، وذلك من المعادلة:

$$ط = \frac{\theta ح (دس) ع^2}{2}$$

ويعرف فيض الطاقة ف ر (أو كثافة طاقة الرياح) بمعدل تغير المقدار  $\frac{ط}{ح}$  بالنسبة للزمن ويعطى من المعادلة ف ر  $= \frac{دط}{دز} \times \frac{1}{ح} = \frac{ف}{2} \left( \frac{دس}{دز} \right) ع^2$

$$= \frac{1}{2} \theta ع^2.$$

ولا تتاح شدة (كثافة) قدرة الرياح بكاملها لتحويلها إلى شغل مفيد، وأكبر قدرة يمكن استخلاصها من تيار الرياح هي  $\frac{16}{27} \times \text{ف ر} = 0,593 \times \text{ف ر}$ . ويطلق على هذا المقدار حد بيتز **Betz limit**.

وبما أن شدة قدرة الرياح تختلف طبقاً لمكعب سرعتها، فينبغى أن يصمم توربين الرياح بحيث يمكنه العمل عبر نطاق عريض من التغير فى  $\text{ف ر}$  حتى يستوعب التغيرات النمطية فى سرعة الرياح، فعلى سبيل المثال، إذا تميزت مساحة ما بسرعة رياح متوسطها  $\text{ع م}$ ، فإن كثافة القدرة المتاحة إذا هبطت سرعة الرياح إلى  $0,5 \text{ ع م}$ ، تصبح فقط  $\frac{1}{8}$  تلك المتاحة مع السرعة  $\text{ع م}$ ، فى حين إذا تضاعفت السرعة إلى  $2 \text{ ع م}$  فإن كثافة القدرة تتضاعف ٨ مرات عن تلك المناظرة للسرعة  $\text{ع م}$ ، وعلى ذلك لا تغل سرعات الرياح التى تقل عن المتوسط إلا الضئيل من القدرة المفيدة، ومن ناحية أخرى فإن السرعات التى تتجاوز بكثير المتوسط، تشكل استهلاكاً عالياً لأجزاء التوربين (المحرك)، ولذا فإن التحدى الفنى يتمثل فى تصميم محرك رياح يمكنه أن يعمل بكفاءة واعتمادية عبر التغيرات الكبيرة فى قيمة  $\text{ف ر}$ ، على الرغم من الظروف الجوية التى تصل إلى حد التطرف، مع الحد الأدنى من متطلبات الصيانة، والنزول بالتكاليف الرأسمالية الابتدائية على قدر الإمكان.

ولا تبقى سرعة الرياح فى منطقة ما ثابتة، وإنما تتغير على مدار فترات من الزمن بالثوانى والساعات (تغير يومى نهارى) والأيام والشهور (التغير الموسمى). وينبغى أن يواجه توربين الرياح التغيرات الكبيرة فى سرعة الرياح، ويشير إلى التذبذبات التى تحدث على مدى الثوانى أو الدقائق (بالاضطرابات)، وقد تتسبب فى كلل (\*) أجزاء توربين الرياح وانهيارها (كالريش وأعمدة التوصيل والمولدات).

---

(\*) الكلل **fatigue**: خاصية ميكانيكية للمواد تدل على مدى قدرتها على تحمل التغيرات الدورية فى الإجهادات المسلطة عليها (المترجم)



ومن المعتاد - لحساب شدة قدرة الرياح - قياس متوسط سرعة الرياح على مدار فترة زمنية (ساعة عادة)، وتوصف التكرارية التي تتواتر بها مختلف سرعات الرياح بتوزيع تكرارية سرعة الرياح  $T$  (س) والتي يمكن أن تتغير يوميًا وفصليًا، وإذا لم تتح معلومات عن توزيع التكرارية فيفترض توزيع رالي في الغالب، وتأخذ دالة شدة احتمالية رالي Rayleigh الشكل:

$$T (س) = \frac{ط}{٢} (س م)^{-٢} \times هـ^{-٠.٢٥} ط \left( \frac{س}{س م} \right)^٢$$

وربما تغيرت سرعة الرياح وتوزيعها التكرارى مع الارتفاع، وعلى العموم تؤخذ القياسات للرياح عند ارتفاع معيارى هو في الغالب قريب من ١٠ أمتار، ويختلف ذلك عن ارتفاع محور توربينات الرياح الحديثة، والذي يتراوح بين ٢٥ إلى ٥٠ مترًا، ولتعميم هذه القياسات لتشمل الارتفاع المطلوب يفترض في الغالب أن سرعة الرياح تتناسب مع الارتفاع مرفوعًا إلى الأس  $\frac{١}{٧}$ .

ويطلق على زيادة سرعة الرياح مع الارتفاع عن سطح الأرض ع عادة اسم القص الريحي wind shear، وهو في العادة دالة في وعورة السطح، وسرعة الرياح ومدى استقرار الجو.

وتأسيسًا على بيانات مأخوذة من عدة مواقع تكون هذه الدالة - للمناطق ذات وعورة سطح منخفضة في الصورة:

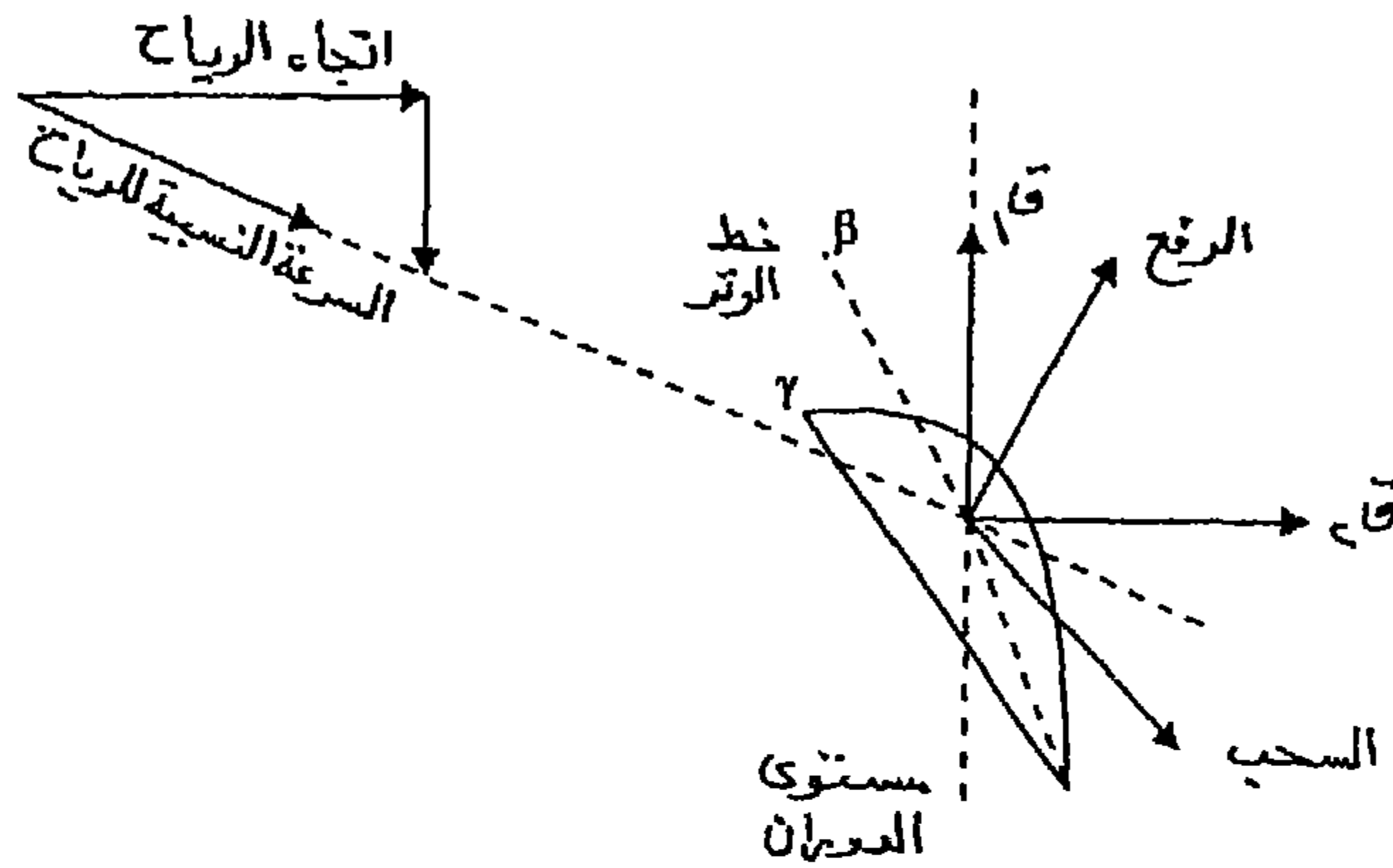
$$س (٢٤) = س (١٤) \times \left( \frac{٢٤}{١٤} \right)^{\frac{١}{٧}}$$

**الديناميكا الهوائية:**

تستخلص توربينات الرياح الحديثة الطاقة من تيار الرياح عن طريق تحويل طاقة حركة الرياح الخطية إلى الحركة الدورانية المطلوبة لإدارة المولد الكهربى، وينجز هذا التحويل في جزء دوار rotor ذى ريشة أو ريشتين أو ثلاث ريش أو

سطح انسيابي مثبت بالمحور، وتولد الرياح المنسابة عبر أسطح هذه الأشكال الانسيابية القوى التي تتسبب في دوران الجزء الدوار.

ويولد الهواء المنساب بسلاسة فوق الشكل الانسيابي قوتين: الرفع lift الذي يعمل في اتجاه عمودي على تيار الهواء، والسحب drag الذي يعمل في اتجاه التيار (شكل ١٠ - ١)، وإذا لم يكن تيار الهواء متصلا، فإن قوة الرفع تنقلص ويقال للسطح الانسيابي إنه (أعيق stall) وتتاسب كلا قوتي الرفع والسحب مع كثافة الهواء، ومساحة الشكل الانسيابي ومربع سرعة الرياح (في حالة السريان الرقائقي) laminar flow وتصل القوتان إلى قيمتهما القصوى عند قيمة محددة لزاوية الالتقاء  $\gamma$  (وهي الزاوية بين متجه سرعة الرياح النسبية وخط الوتر أو الخط القطري) وحيث إن سرعة الريشة تزداد مع المسافة عبر سطح الشكل الانسيابي، فينبغي أن تتغير بالتبعية زاوية الالتقاء على طول هذا السطح، وبعبارة أخرى، ينبغي أن يتقوس (ينحني) الشكل الانسيابي لنحصل على الحد الأعلى من الكفاءة.



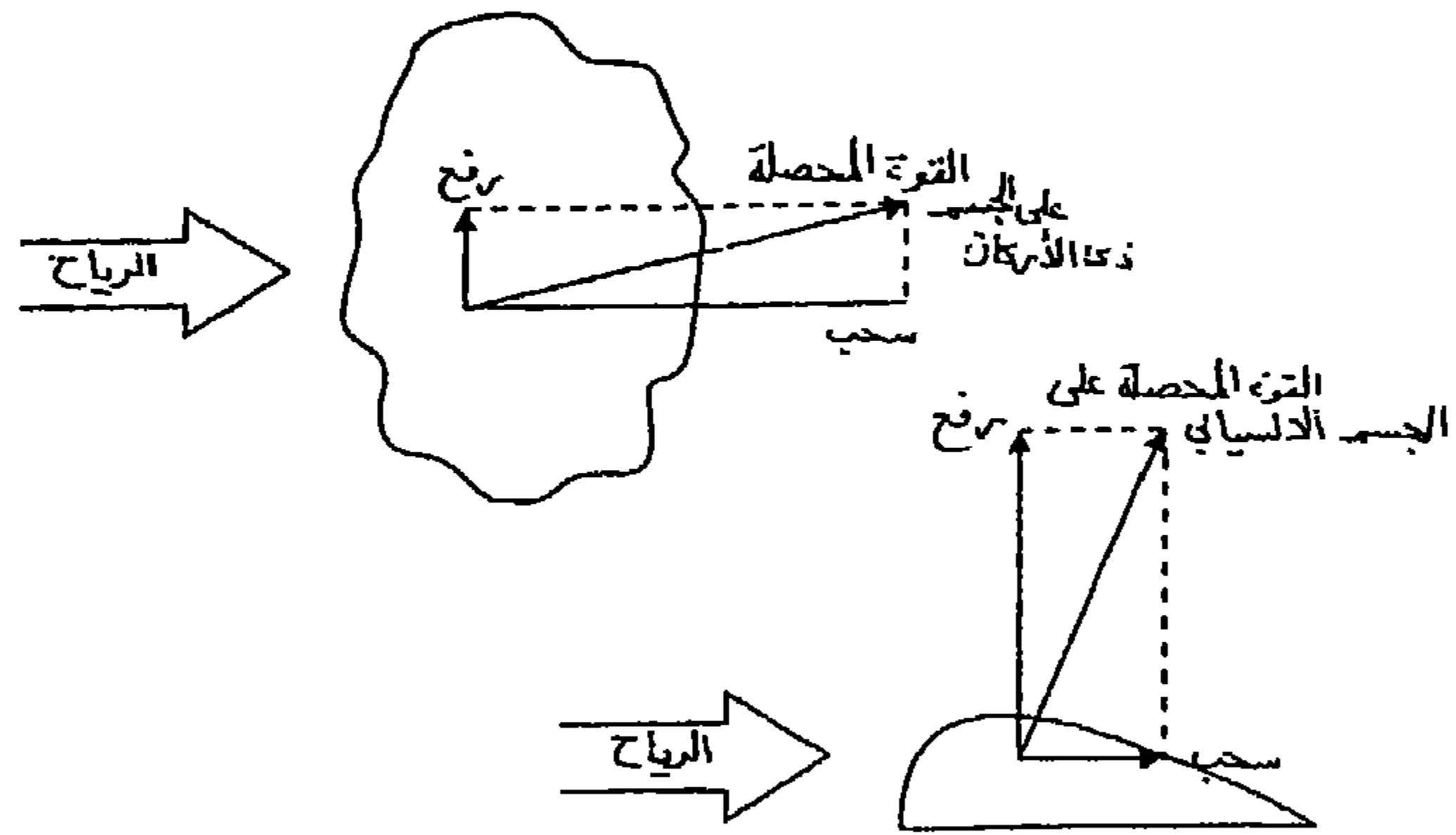
شكل (١٠ - ١)

قوة الرفع وقوة السحب وزاوية الالتقاء  $\gamma$  وزاوية الخطوة  $\beta$  لسطح انسيابي لتوربين رياح

وقوة الرفع وقوة السحب عمودية وموازية - على الترتيب - لسرعة الرياح كما يدل على ذلك دوران الجزء الدوار، ويمكن تحليلهما إلى مركبتين (قوتين) ق<sub>١</sub> في اتجاه الحركة الانتقالية للشكل الانسيابي، ق<sub>٢</sub> في اتجاه الرياح الساكنة غير المثارة *undisturbed wind*. والقوة ق<sub>١</sub> هي المتاحة للحصول على الشغل النافع، في حين أن البرج والأجزاء الهيكلية من توربين الرياح تصمم بحيث تتحمل ق<sub>٢</sub> (والتي يطلق عليها قوة دفع الجزء الدوار).

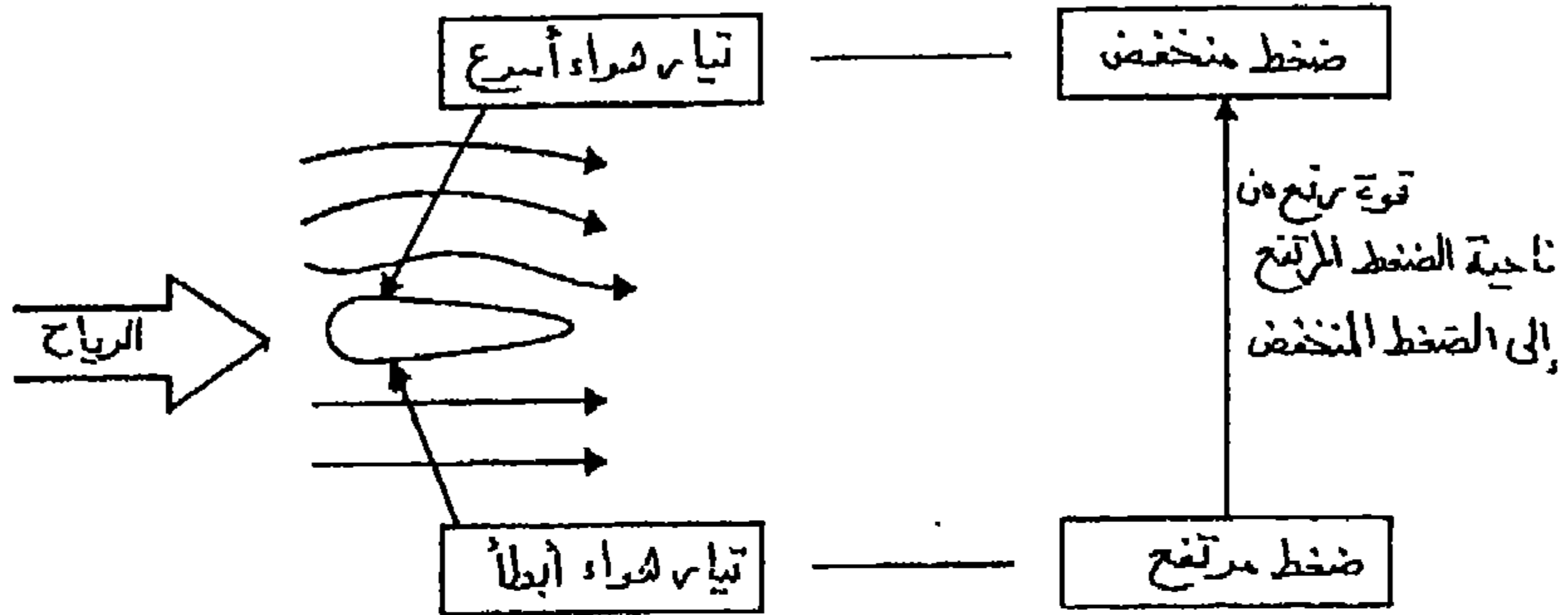
### قواعد تحويل طاقة الرياح:

عند هبوب الرياح فإنها تسلط نوعين من القوى على الأجسام التي في مسارها: الرفع والسحب، وتعمل قوى السحب في نفس اتجاه هبوب الرياح في حين تعمل قوى الرفع في اتجاه عمودي على حركة الرياح، ويعتمد الحجم النسبي لكل من قوتي السحب والرفع بالكامل على شكل الجسم، فالأجسام ذات الشكل الانسيابي تتعرض لقوى سحب أضال من تلك التي تتعرض لها الأجسام غير الانسيابية (ذات الأركان) وتولد الرفع يتسبب دائماً في قدر ما من قوى السحب، والأجسام ذات الشكل الانسيابي المناسب يمكن أن تبلغ قوى رفعها ٣٠ ضعفاً من قوى السحب، ويوضح شكل (١٠ - ٢) النسب بين قوى الرفع والسحب للأجسام غير الانسيابية والانسيابية، وتجهيزات الرفع - بطبيعتها أكثر كفاءة من تجهيزات السحب، وتتجم قوى الرفع كنتيجة للفرق بين سرعتي تيار الهواء المنساب حول جانبي السطح المحمول، إذ يهبط الضغط قرب السطح الذي يتحرك الهواء المنساب عبره بسرعة أكبر، ويخلق ذلك فرقاً في الضغط على جانبي السطح، وهذا الفرق في الضغط ينتج بدوره قوة متجهة من ناحية الضغط الأعلى إلى الناحية ذات الضغط المنخفض، ويوضح شكل (١٠ - ٣) تولد قوى رفع الجسم الانسيابي الناجمة عن الفرق في الضغط.



شكل (١٠ - ٢)

القيم النسبية لقوتى الرفع والسحب لجسم ذي أركان وجسم وانسيابي



شكل (١٠ - ٣)

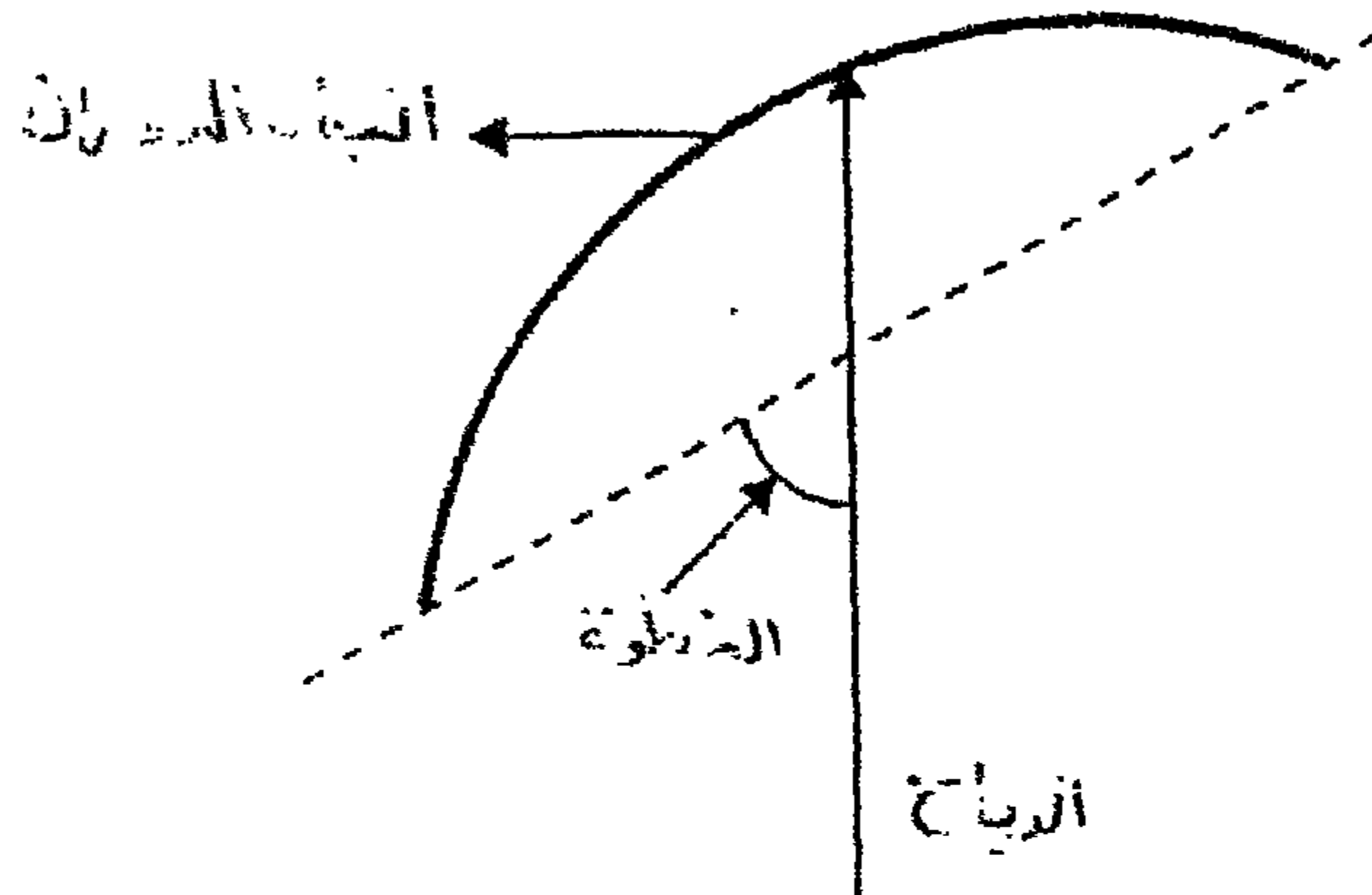
كيف يولد السطح الانسيابي قوة الرفع

## تصميم الجزء الدوار:

من المفيد حتى نستوعب أثر الاختلافات في تصميم الجزء الدوار، أن نصف كيف يكون رد فعل ريش الجزء الدوار إزاء الرياح، وأن نعرف بعض عوامل التصميم المعيارى.

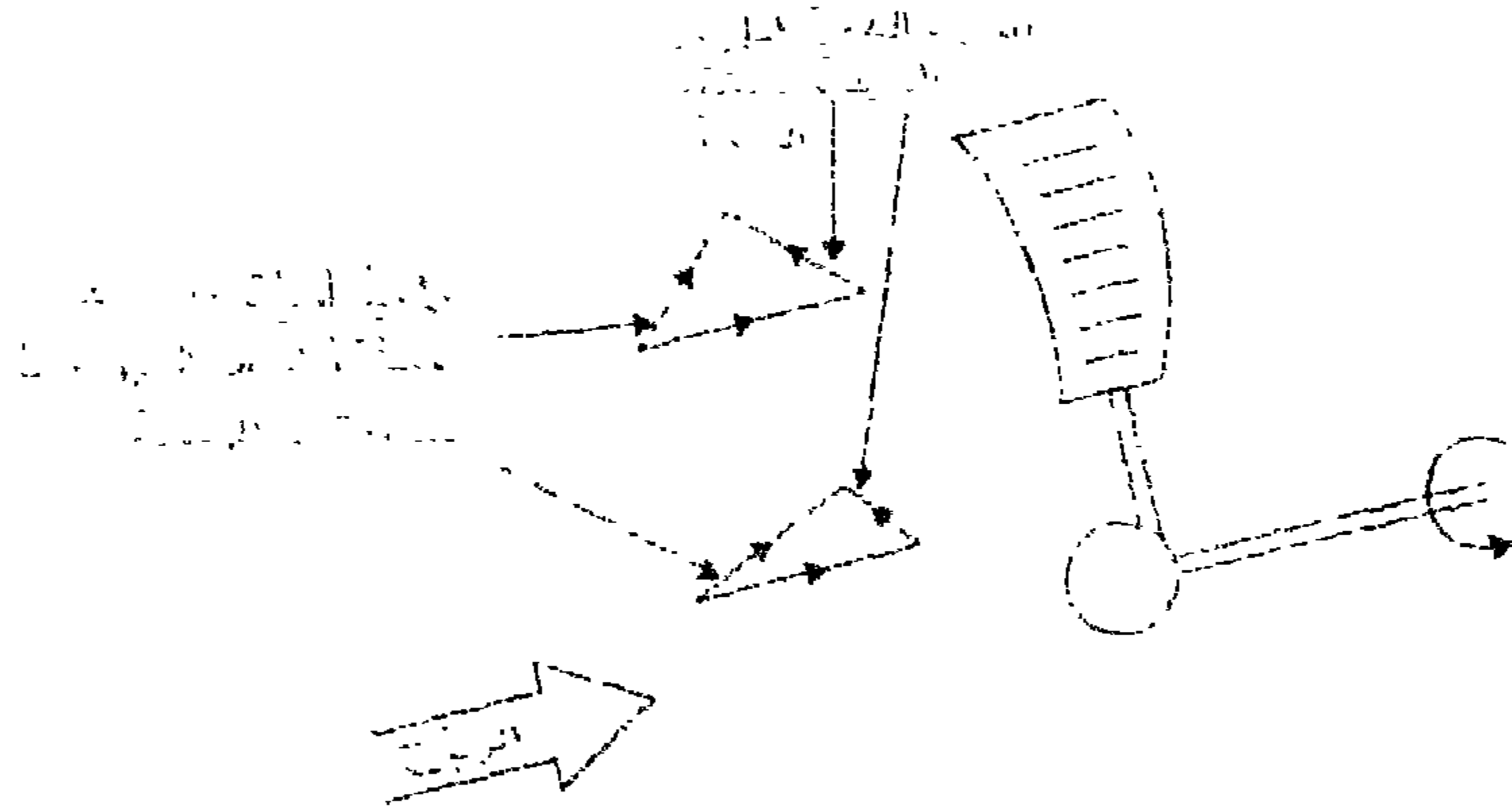
### الخطوة Pitch:

تأخذ ريشات العضو الدوار شكلاً منحنياً حتى تحرف مسار الرياح، كما هو موضح بشكل (١٠-٣) وتسبب قوى الرفع المتولدة دوران العضو الدوار، ولكى نحصل على أقصى قدر من قوى الرفع ينبغي أن تتركب الريشات بالزاوية المناسبة الصحيحة بالنسبة لاتجاه الرياح، وهى ما يطلق عليها الخطوة Pitch (شكل ١٠ - ٤)، وبما أن أطراف الريش تتحرك أسرع من النقاط الأقرب إلى المحور، فإن زاوية الرياح (وكما ترى من منظور الريشة) تتغير مع تغير نصف القطر (شكل ١٠ - ٥).



شكل (١٠ - ٤)

رسم بياني تخطيطي يبين زاوية الخطوة لريشة الجزء الدوار



شكل (١٠ - ٥)

تغير خطوة الريشة بتغير نصف القطر

ويكون للجزء الدوار أقصى كفاءة إذا كانت هذه الزاوية من منظور الريشة أكبر بقدر الإمكان، بشرط ألا تزيد عما يسبب التوقف المفاجئ stalls للجزء الدوار، ولزيادة الزاوية على طول الريشة ينبغي تقويس سطح الأخيرة، ولذات السبب ولجزء دوار مصمم ليدور بسرعة - كتوربين رياحي ذي ريشتين أو ثلاث - تركيب ريشاته على خطوة أصغر.

#### نسبة الإشغال solidity:

تعرف (نسبة الإشغال) عادة بالنسبة التي تشغلها ريشات الجزء الدوار من محيطه الكلي، فعلى سبيل المثال إذا كان لجزء دوار قطره ٦ متر ٢٤ ريشة، يبلغ عرض كل منها ٠,٣٥ متر، فله إشغال نسبته

$$= \frac{0,35 \times 24}{6 \times \pi} \times 100 = 45\%$$

وبعبارة أخرى يعنى الإشغال الكسر من مساحة الجزء الدوار التي يشغلها المعدن.

والمعادلة العامة لنسبة الإشغال هي:

$$\text{الإشغال \%} = (31,8 \times \text{عدد الريشات} \times \text{عرض الريشة}) \div \text{قطر الجزء}$$

الدوار

وكما زادت نسبة الإشغال، قلت سرعة الدوران التي يحتاجها الدوار لمواجهة الرياح، فتوربين الرياح ذو الريشتين أو الثلاث له نسبة إشغال منخفضة ومن ثم يحتاج لدوران سريع لمواجهة الرياح، وإلا تعرض الكثير من طاقة الرياح للفقدان من جراء وجود فجوات كبيرة بين الريشات.

### نسبة السرعة الطرفية:

ويقصد بها النسبة بين سرعة أطراف الريشة إلى سرعة الرياح، فعلى سبيل المثال إذا كانت سرعة الجزء الدوار ٢٠ لفة في الدقيقة وكانت سرعة الرياح ٤ م/ث، فإن نسبة السرعة الطرفية هي:

$$\text{ط} = \frac{60 \div 20 \times 6}{4} = 1,6$$

والمعادلة العامة هي:

نسبة السرعة الطرفية =  $(0,052 \times \text{قطر الجزء الدوار بالمتر} \times \text{سرعة الدوران باللفة / دقيقة}) \div \text{سرعة الرياح م / ث}$ .

فإذا كان الجزء المتحرك يدور بسرعة خطية أعلى من سرعة الرياح فإن نسبة سرعته الطرفية تتجاوز الواحد الصحيح، وعلى العكس من ذلك إذا كان يدور بسرعة خطية أقل من سرعة الرياح فتكون نسبة سرعته الطرفية أقل من ١، والدوار الذي يعتمد في دورانه على قوى السحب مثل البانامونات (\*) panamones

---

(\*) انظر شكل ( ١٠ - ٩ جـ ) (المترجم)

محال أن يدور بأسرع من سرعة الرياح، ودائمًا ما تقل نسبة سرعتها الطرفية عن ١. ولتوربينات الرياح ذات الريشتين أو الثلاث، والتي تدور بسرعات عالية، نسبة سرعة طرفية مرتفعة تتراوح بين ٣، ١٠. والدورات متعددة الريشات والمناسبة لضخ الرياح تتراوح نسبة سرعتها الطرفية ما بين ١، ٢. ولكل دوار قيمة مثلى للسرعة الطرفية، تصل لديها كفاءته إلى حدها الأعلى.

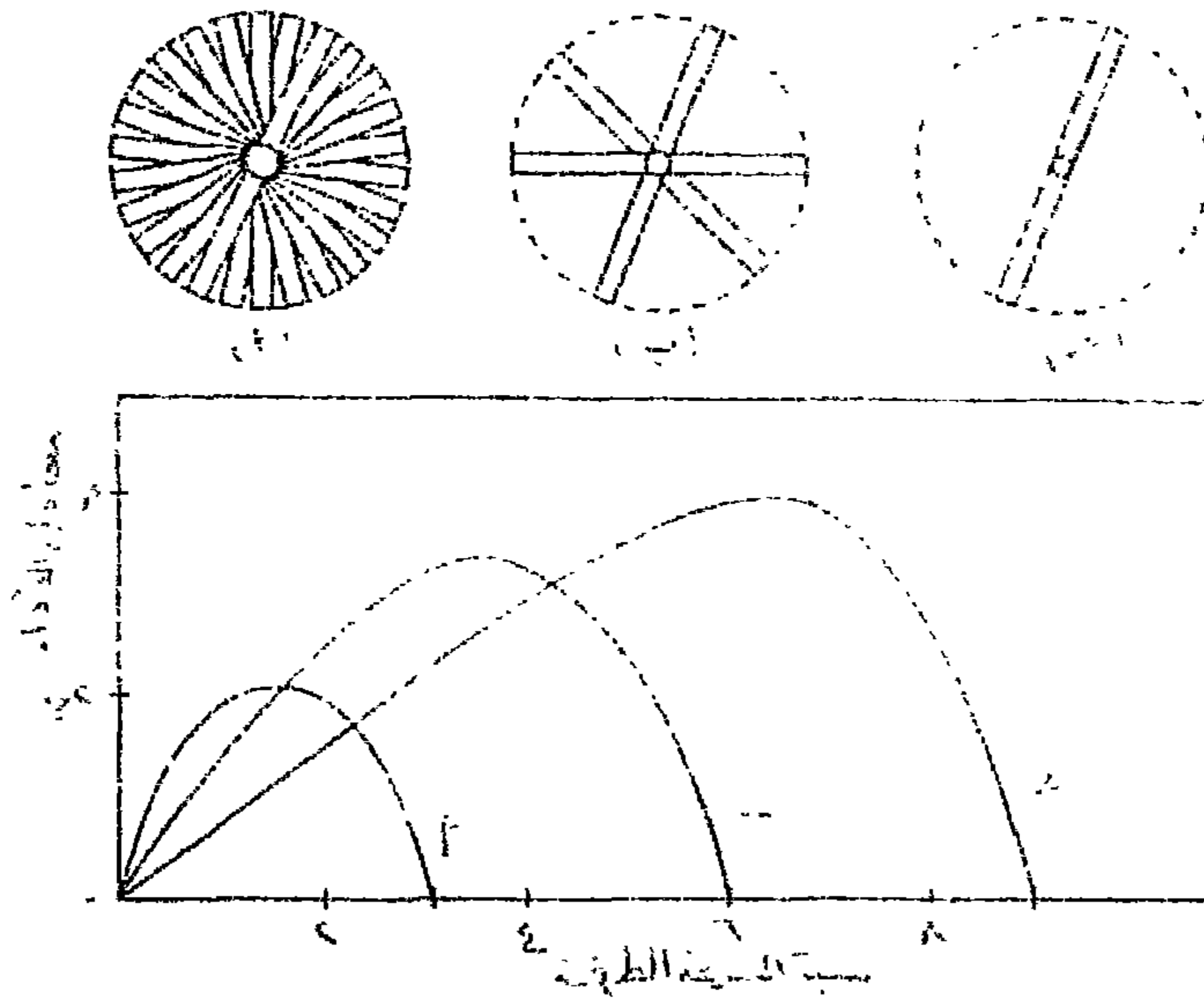
### معامل الأداء:

معامل أداء الجزء الدوار هو الكسر من قيمة طاقة الرياح المارة خلال قرصه، والذي يتحول إلى قدرة ينقلها محوره. وهو مقياس لكفاءة الدوار ويختلف تبعًا لنسبة السرعة الطرفية، وفي شكل ( ١٠ - ٦ ) علاقة نمطية بين السرعة الطرفية ومعامل الأداء، ولكل نوع من الدورات رسم بياني مميز لهذه العلاقة يختلف عن غيره.

### عزم الدوران:

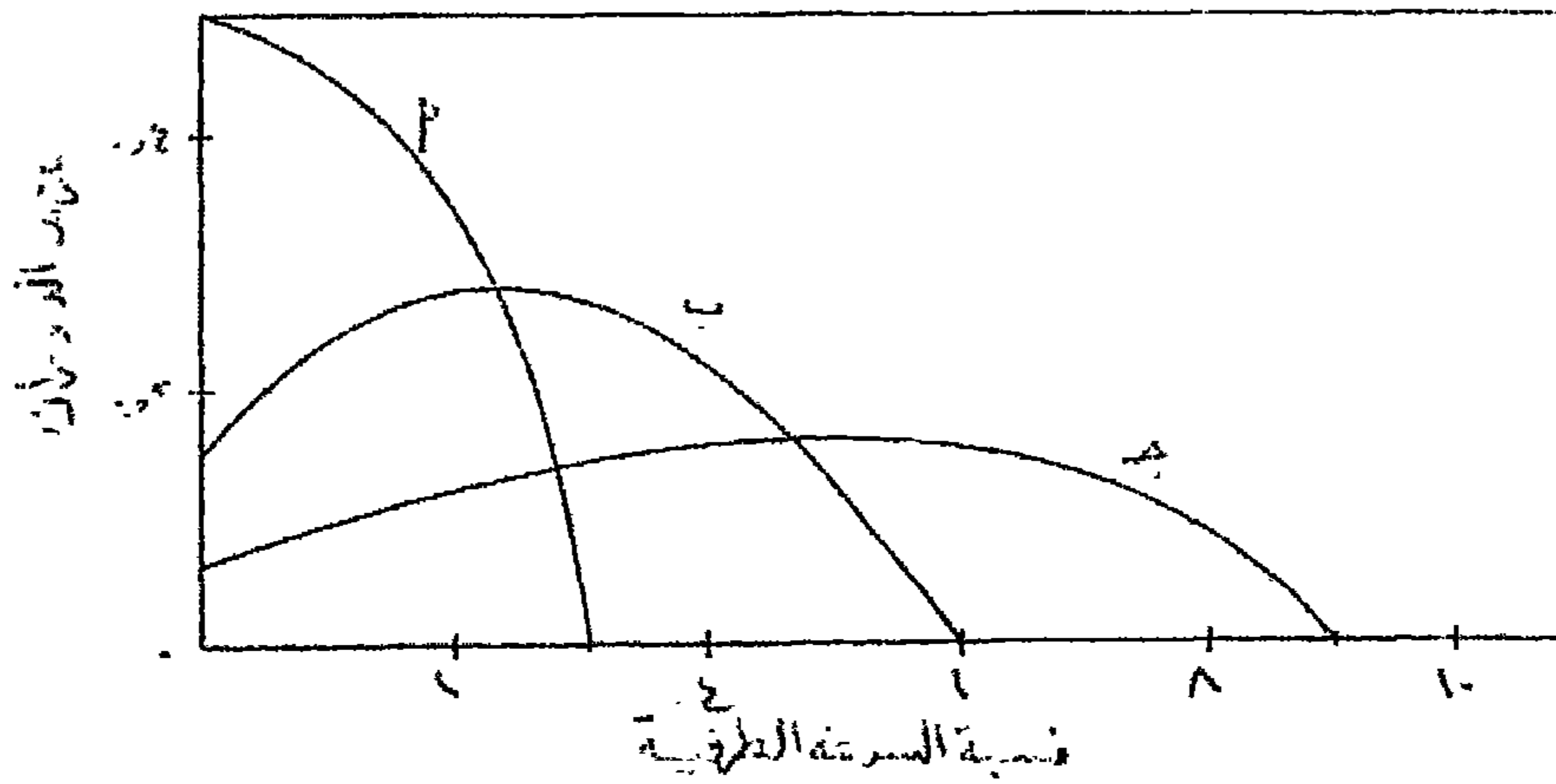
عزم الدوران هو العزم المتولد في الجزء الدوار، وهو يعتمد على (نسبة الإشغال) ونسبة السرعة الطرفية، والدورات ذات نسبة الإشغال العالية ونسبة السرعة الطرفية المتدنية (كدورات مضخات الرياح متعددة الريشات) تولد عزوم دوران أعلى من تلك ذات نسب الإشغال المنخفضة والسرع العالية (كتوربينات الرياح)، وهو ما يوضحه شكل ( ١٠ - ٧ ) والملح الجدير بالملاحظة هو أن الآلات ذات السرعات العالية لها معامل أداء أقصى يزيد قليلًا ولكن لها عزم ابتداء starting torque منخفضًا، وعلى النقيض من ذلك يولد الدوار ذو نسبة إشغال عالية، عزمًا ابتدائيًا مرتفعًا إلا أن أقصى معامل أداء له يتدنى قليلًا.





شكل (٦ - ١٠)

منحنيات علاقة معامل الأداء بنسبة السرعة الطرفية لدوارات ذات نسب إشغال متنوعة



شكل (٧ - ١٠)

منحنيات تبين علاقة عزم الدوران بنسبة السرعة الطرفية لدوارات ذات نسب إشغال مختلفة

ويعتمد اختيار نوع الدوار على خواص الحمل المطلوب، والمضخة ذات الإزاحة الإيجابية **positive displacement pump** (كالمضخات ذات الكباسات) المستعملة في عمليات الثقب، تحتاج إلى عزم ابتدائي مرتفع عن عزم التشغيل العادي، لذا فاستعمال دوار ذي نسبة إشغال عالية أمر جوهري، ما لم تدمج طريقة ما لرفع الحمل عن الدوار لمعاونته أثناء بدء القيام، وعلى أية حال فمولدات الكهرباء لا يلزمها عزم مرتفع لإدارتها ابتداءً، وإنما يحتاج أن تدار في سرعات عالية، ومن ثم يلزم لها عمومًا دوار ذو سرعة عالية ونسبة إشغال منخفضة مما يناسب مقتضيات الحمل المطلوب، ومضخات الإزاحة الإيجابية، والتي لا يستعمل غيرها مع مضخات الرياح تحتاج إلى عزم ابتداء كاف (عال نسبيًا)، إلا أن استمرار تشغيلها يحتاج لعزم أقل، وسيبقى دوار مضخة الرياح في تشغيله عند سرعة يتوافق لديها العزم المتولد بالضبط مع العزم اللازم للمضخة، ولهذا السبب تعود أهمية خصائص منحنى العزم في مضخة الرياح، ولكي يتوفر عزم ابتدائي مرتفع يلزم دوار ذو نسبة إشغال عالية.

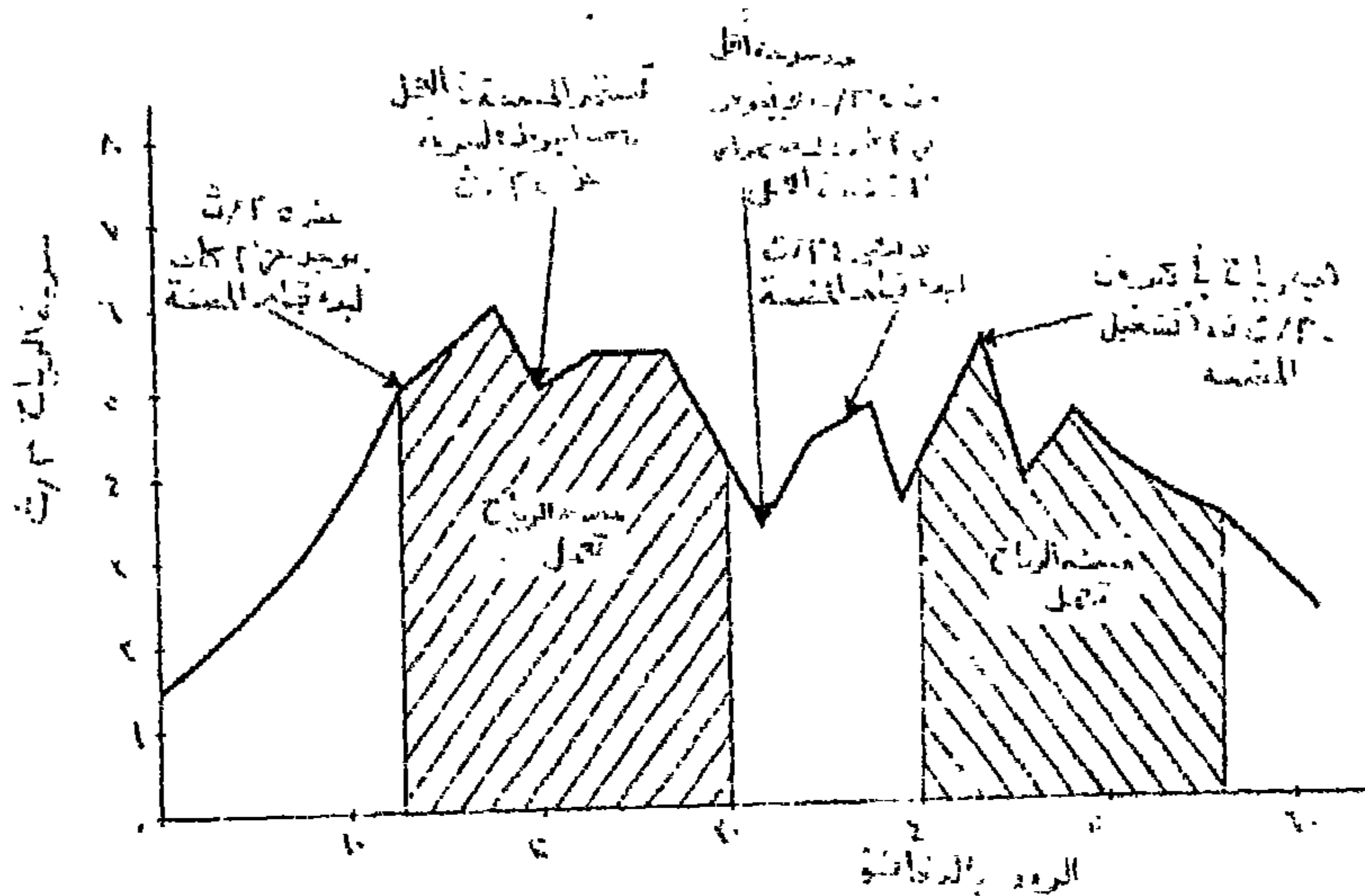
لذا تصمم كل مضخات الرياح تقريبًا بنسبة إشغال عالية وبدورات متعددة الريش.

ويلزم للمضخة الترددية ذات الإزاحة الموجبة عزم ابتدائي لقيامها يساوي تقريبًا ثلاثة أمثال العزم اللازم لدورانها التشغيلي المعتاد، ويعنى هذا أنه حتى إذا عملت مضخة رياح عند سرعات رياح منخفضة، فإنها ستحتاج إلى دفقة (هبة) رياح ذات سرعة أعلى لقيامها في البداية. ويبين شكل (١٠ - ٨) تخطيطًا للرسم البياني لتأثير عزم الابتداء العالى على زمن تشغيل مضخة الرياح مع أمثلة رقمية.

## التصميمات المختلفة للدوار:

تستعمل طواحين الهواء أفقية المحور ذات الريشتين أو الثلاث ريشات (شكل ١٠ - ٩ أ) في توليد الكهرباء، إلا أنها لا تصلح للاستعمال مباشرة في ضخ المياه للأسباب التالية:

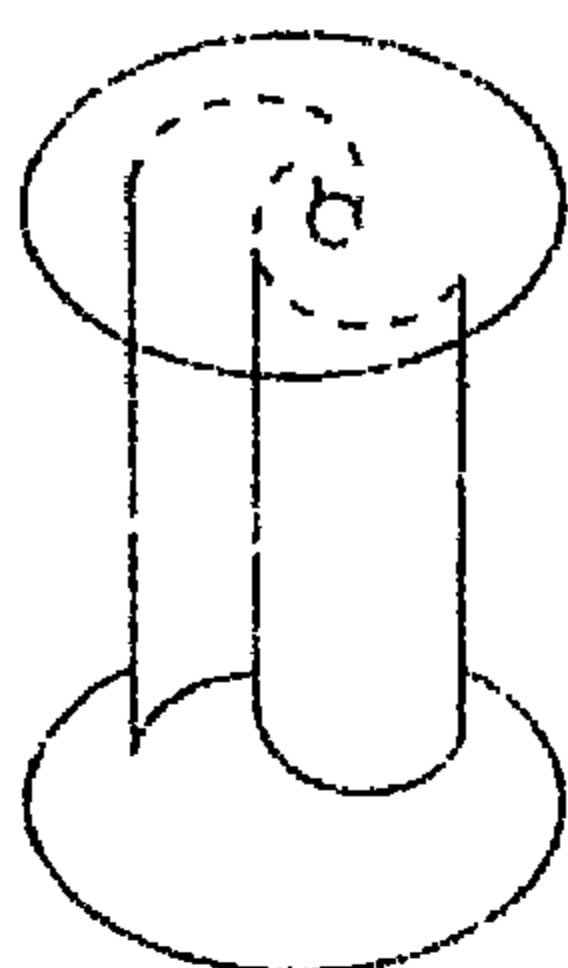
- (١) ليس بمقدورها توليد عزم كاف لبدء قيام مضخة ذات كباس.
- (٢) تدور بسرعة تفوق كثيراً ما يلزم للتشغيل المباشر لمضخة ترددية، كما يصعب تصنيع توربينات الرياح هذه، نظراً للدقة الهندسية المتناهية المطلوبة لذلك، على أية حال فيمكن استعمالها بأسلوب غير مباشر لضخ المياه وذلك بتوليد الكهرباء ثم استعمال هذه الكهرباء في إدارة المضخات وإذا كان هذا البديل مكلفاً إلا أنه قد يلائم بعض المواقع، أو إذا لزمّت مقادير كبيرة من القدرة.



شكل (١٠ - ٨)

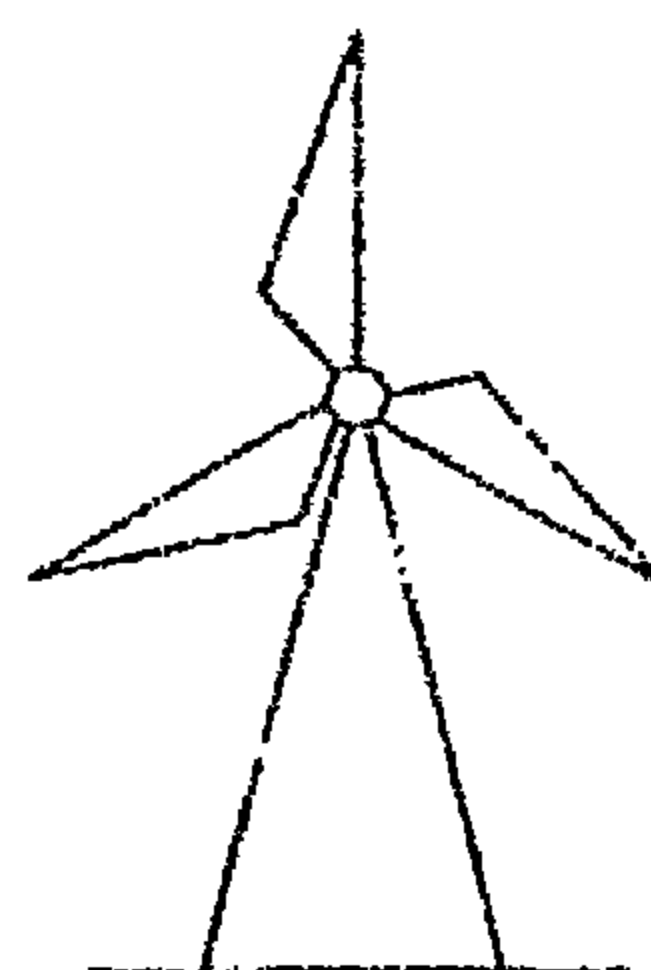
مثال عددي يوضح تأثير عزم الابتداء العالي على أداء مضخة رياح

وغالبًا ما تدار الدورات السافونية(\*) *savonius rotors* بفعل قوى السحب، أكثر من قوى الرفع، ومن هنا فهي لا تتسم بالكفاءة، كما تدور ببطء شديد (شكل ١٠ - ٩ب) وتدار البانامونات (شكل ١٠ - ٩ج) بالكامل بفعل قوى سحب الرياح، وهي تعاني من ذات عيوب الدورات السافونية، أما توربينات الرياح من نوع داريسوس *Darrius* ذات التدفق العرضي *Cross flow* (شكل ١٠ - ٩د) فتثير اهتمامًا متزايدًا، بيد أنها لا تناسب ضخ المياه حيث لا يمكنها بدء الحركة ذاتيًا في المعتاد، وحتى إذا ما عدل تصميمها لتقوى على بدء الحركة ذاتيًا فليس باستطاعتها توليد عزم كاف لبدء تشغيل مضخة، كما تصعب حمايتها من التلف بفعل العواصف ولم يتم حتى الآن تصنيعها بتكاليف تقل عن تكاليف الدورات ذات المحور الأفقي.



شكل ( ١٠ - ٩ ب )

رسم تخطيطي لدوار سافونيس (مسقط جانبي)

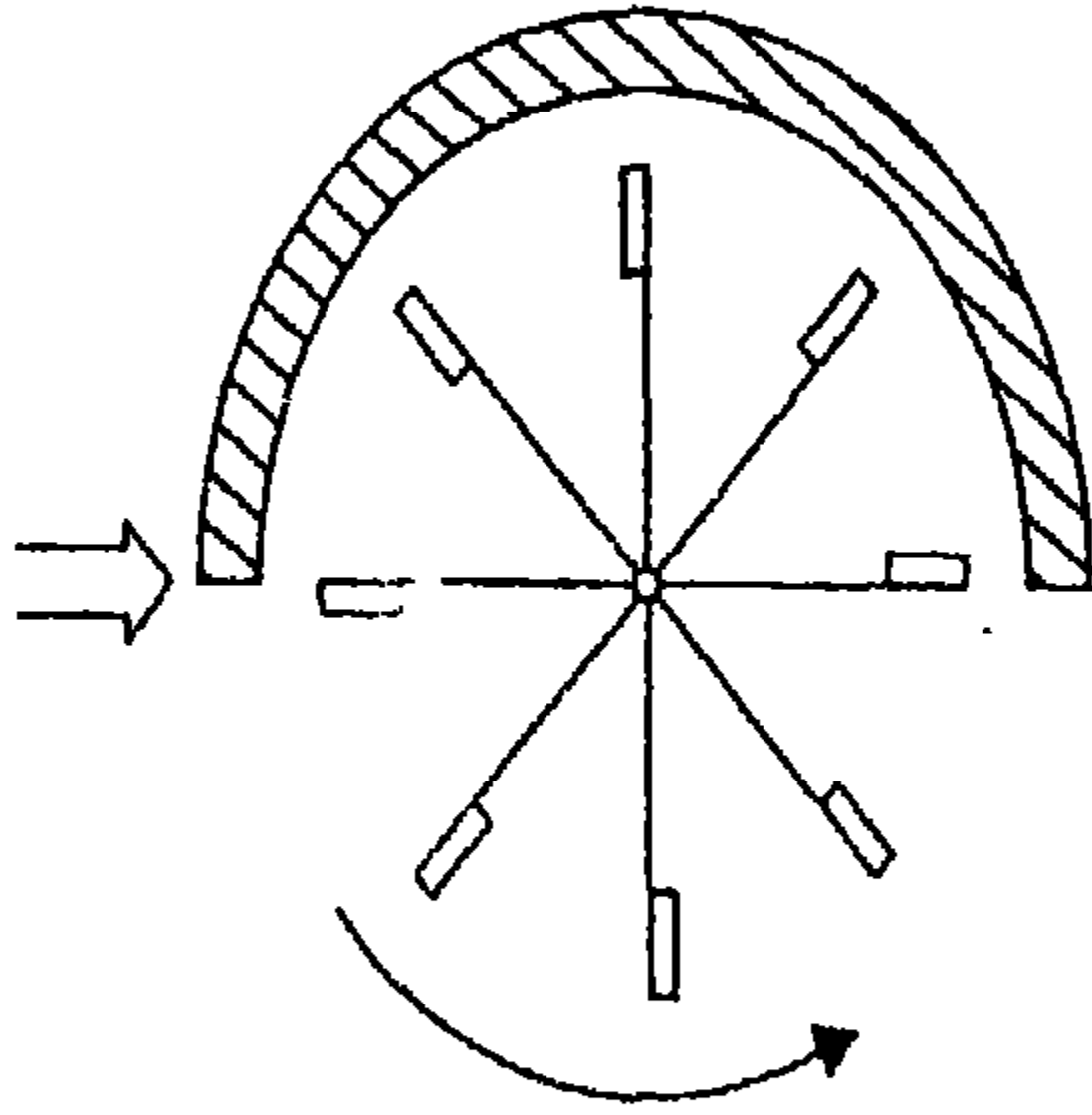


شكل ( ١٠ - ٩ ا )

طاحونة هواء ذات ثلاث ريشات وبمحور أفقي

---

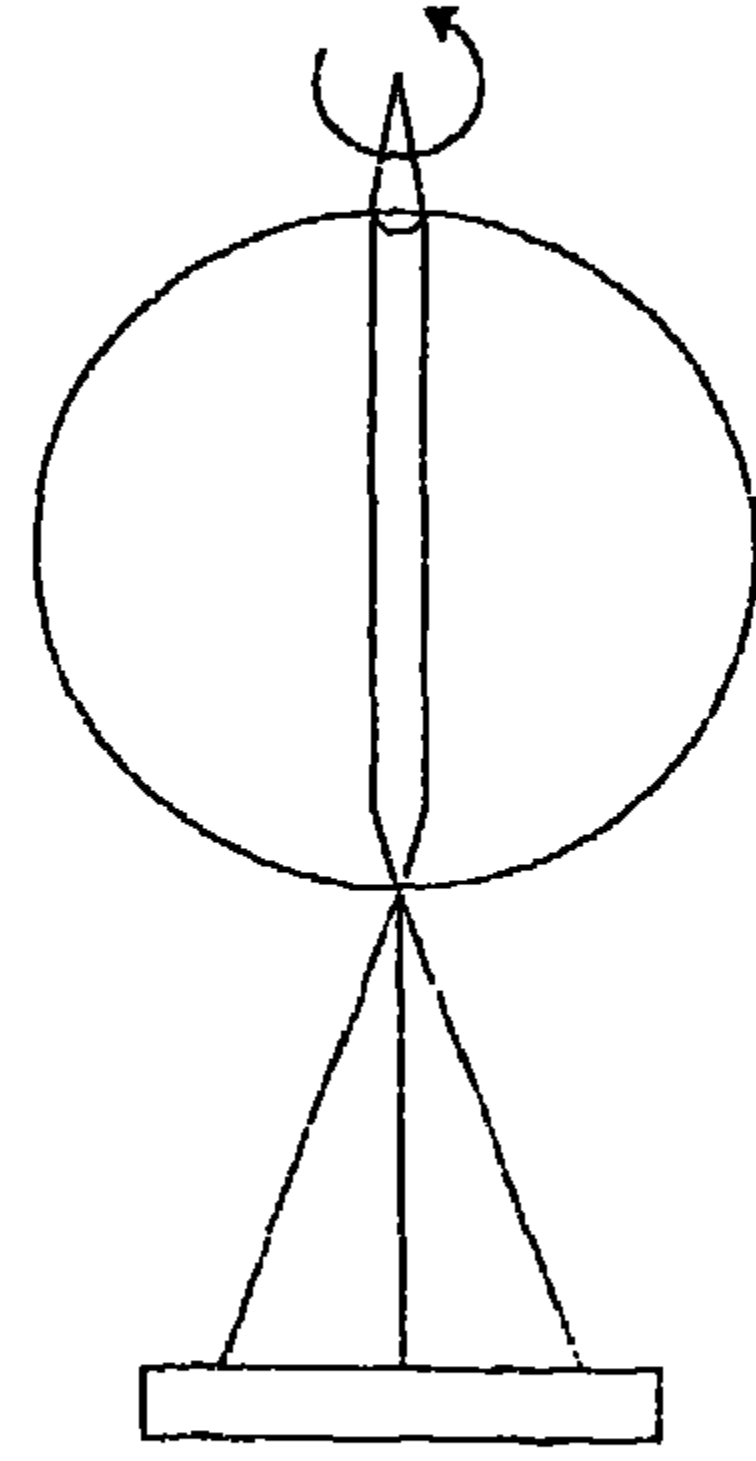
(\*) الدورات السافونية *savonius rotors* نوع من توربينات الرياح الرأسية لاستغلال طاقة الرياح اخترعها المهندس الفنلندي سافونيس عام ١٩٢٢ (المترجم)



شكل ( ١٠ - ٩ د )

رسم تخطيطى لتوربين رياح دارىوس

(مسقط جانبى)



شكل ( ١٠ - ٩ ج )

باتامون

### تقييم الموقع المناسب:

العوامل اللازم قياسها فيما يخص الرياح:

- ١ - متوسط سرعة الرياح على مدار السنة.
- ٢ - متوسط سرعة الرياح على مدى الشهر (لكل شهر على حدة).
- ٣ - التغير النمطى فى سرعة الرياح خلال اليوم الواحد (لكل شهر).
- ٤ - التوزيع السنوى لفترات خمود الرياح وامتداد كل منها.
- ٥ - أقصى سرعة لدقائق (هبات) الرياح العالية.
- ٦ - اتجاه الرياح.

وربما يصعب الحصول على بيانات رقمية لكل هذه المتغيرات، وعلى وجه الخصوص قد يعول في تقييم البندين الرابع والخامس فيما سبق، على المقابلات مع سكان الموقع المحليين.

والنحو الأمثل هو أن تؤخذ قياسات هذه المعاملات في الموقع المقترح، وعلى الارتفاع الملائم من سطح الأرض لفترة سنة على أقل تقدير، إلا أن هذه الإمكانية نادرة من الوجهة العملية، ويعول على البيانات المستقاة من المواقع القريبة، وينبغي حساب التفاوت ما بين موقع أخذ القياسات، والموقع المأخوذ في الاعتبار والجوانب المهمة في هذه التفاوتات هي:

(١) شكل سطح الأرض: كلما زادت وعورة سطح الأرض زادت معاوقة الريح، فالسطوح الوعرة تخلق اضطرابات في طبقات الرياح فيما فوقها، ويوضح الجدول التالي المعامل الذي تؤثر به وعورة سطح الأرض على سرعة الرياح.

معامل سرعة الرياح عند الارتفاعات المختلفة			نوعية سطح الأرض
١٢ متر	٩ متر	٦ متر	
١,٥٠	١,٤٥	١,٤	سطوح مستوية (سطح الأرض - البحيرات - الرمال)
١,٠٥	٠,٩٨	٠,٩٠	سطح ذو وعورة متوسطة (شجيرات صغيرة وما إلى ذلك)
٠,٦٦	٠,٦٠	٠,٥٠	سطوح وعرة (غابات - مبان - إلخ)

والمعادلة العامة لهذا المعامل هي:

سرعة الرياح عند منطقة مقترحة بعينها = سرعة الرياح المعروفة في نقطة أخرى x معامل المنطقة المقترحة ÷ معامل المنطقة المعروفة.

(٢) وجود تلال أو وديان أو سلسلة جبال: تواجه التلال الدائرية والقمم وسلاسل الجبال عموماً رياحاً ذات سرعات أعلى وإن كانت متغيرة القيمة - مما تواجهه الأراضي المسطحة، وتزداد سرعة الرياح فوق التلال، وعلى أية حال فقد تتولد اضطرابات دوامية على الجانب الآخر من التل (شكل ١٠ - ١٠). ويعتمد مقدار التسارع الذي يحدث للرياح لدى مرورها على تل أو سلسلة جبال بشكل كبير على ارتفاع التل وهيئته، وليس بالإمكان تحديد معاملات لكل أنواع الجبال المختلفة، غير أن شكل (١٠ - ١٠) يعطى قيماً تقارب الواقع ويمكن استعمالها في الحصول على تقريب مقبول.

(٣) المناطق الساحلية: قد تواجه المناطق الساحلية (حول البحيرات الواسعة وعلى مقربة من البحار) رياحاً عنيفة بأكثر من المناطق داخل البر، ومن الصعوبة بمكان تحديد الزيادة في سرعة الرياح بسبب الوقوع قرب الساحل في صورة رقمية.

وتتوفر البيانات عن سرعة الرياح عادة عند الموانئ والمرافئ، ولنسيم البحر عادة نمط يومي نتيجة فرق درجات الحرارة بين البحر والبر، وتهب الرياح على وجه العموم من البر في اتجاه البحر نهاراً، ومن البحر في اتجاه البر ليلاً (\*).

---

(\*) طبقاً لما ورد بالنص المترجم (المترجم)





فلا بد من إجراء قياسات للرياح أو تقديرها بناء على بيانات من مراكز أرصاد الطقس أو الطيران المدني، وتتصب القياسات اللازمة على سرعة الرياح واتجاهها.

### نوعية البيانات عن الرياح:

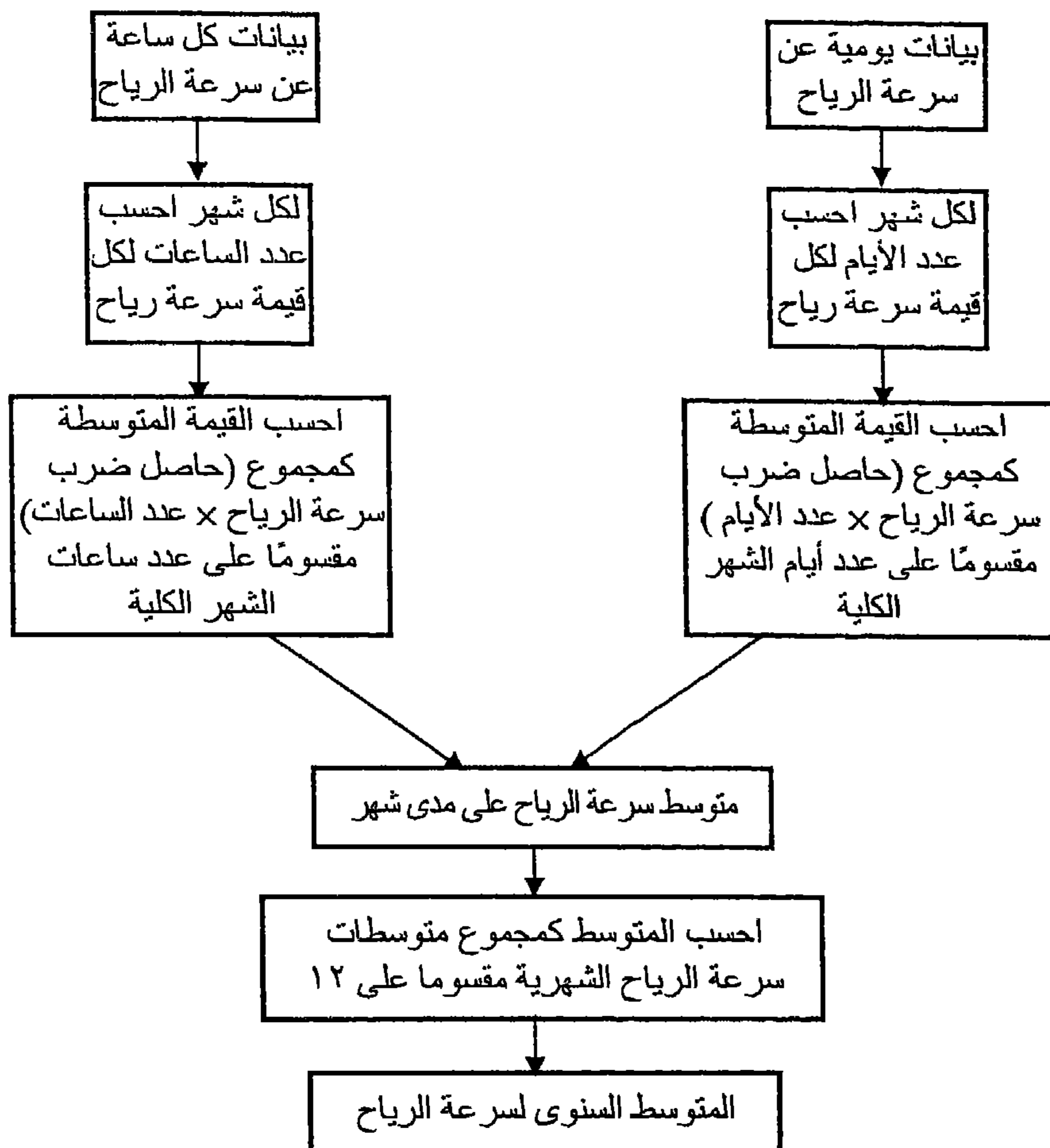
حتى وقت قريب للغاية، لم يكن هناك برنامج ممنهج لجمع البيانات، فيما عدا لدى المطارات الرئيسية، حيث لا بد من تجميع البيانات طبقاً لما تقتضيه الاتفاقات الدولية، ولذلك تجمع معظم البيانات لدى المطارات باستعمال أجهزة الرصد الدائم (المرياح anemometer) المركبة على ارتفاع ١٠ أمتار، وتلك هي المواصفات القياسية لمحطات الأرصاد الجوية.

وقد يكون جهاز رصد الرياح (المرياح) غير دقيق أو موضوعاً في موقع غير ملائم وترجع العلة الرئيسية في عدم الدقة إلى الاحتكاك الحادث في كراسي التحميل، والذي يفضي إلى دورانها ببطء أكثر من اللازم، وبالتبعية فلو صممت منظومة لاستغلال طاقة الرياح وحدد حجمها على أساس بيانات مشكوك في دقتها ولو بدرجة ضئيلة، فاحتمال أن يكون حجم مكونات المنظومة أكبر من اللازم، أكثر من احتمال تصميمها بأحجام أصغر من اللازم، ومن الأهمية كذلك ملاحظة أن هناك - إلى جانب حالات الرياح التي يتم قياس مؤشراتهما، هناك على الأقل حالات بعددها لم يتم قياسها، بل يفوق عدد الحالات غير المقيسة في كثير من الأحيان ما قيس فعلاً، ونظراً للعلاقة التكعيبية بين القدرة المتولدة وسرعة الرياح فمن شأن خطأ بسيط لا يتجاوز أجزاء من المائة أن ينجم عنه تقييم لمتوسط سرعة الرياح بأقل من القيمة الحقيقية قد يفضي إلى تقليل ضخيم في تقدير كمية القوى المحركة المتاحة الحصول عليها منها.

## بدائل القياس الممكنة:

١) استعمل البيانات عن الرياح المتاحة لدى أقرب محطة أرصاد جوية، وعدّلها وفقاً لأية اختلافات في وعورة السطح أو ارتفاعه عن سطح الأرض، وعلى أية حال، فقد لا تتواجد في كثير من الأحوال محطة أرصاد على مقربة من الموقع المقترح تشييد منظومة استغلال الرياح فيه، وكقاعدة عامة ينبغي أن تقع محطة الأرصاد في نطاق لا يبعد بأكثر من ٢٠ - ٦٠ ميلاً عن الموقع المقترح، وكلما زادت وعورة السطح صغر هذا النطاق.

وفي المناطق الريفية ذات التلال، لن تكون لبيانات محطة أرصاد قريبة أية درجة من الدقة، وفي محطات الأرصاد المحلية التي تستعمل بياناتها عن الرياح، يوصى بالتأكد من الارتفاع الموضوع عليه المريح وحالته، ولكي تكون بيانات الرياح وسرعتها ذات جدوى فعلية فينبغي أن توجز في متوسطات سرعة الرياح على مدى شهر، وغالباً ما تكون البيانات على تلك الصورة، وفي غير هذه الحالة يتوجب تعديلها طبقاً للخطوات المبينة بشكل ( ١٠ - ١١ ).



شكل (١٠ - ١١)

رسم تخطيطي لخطوات معالجة البيانات عن الرياح

(٢) البديل الثانى هو الاعتماد على بيانات محدودة من واقع الموقع، فإذا كانت شدة الرياح من الوضوح بموضع ما فمن المستحسن - عند إجراء قياسات ميدانية للرياح لديه - مقارنة تكاليف إجراء هذه القياسات بالتكاليف المترتبة على سوء تقدير الحجم المناسب للمعدات، ومن الموصى به أن تتم القياسات الميدانية للرياح كل ساعة وعلى مدى ثلاثة أشهر على أقل تقدير، وإذا لم يكن أخذ القياسات كل ساعة فى حيز الإمكان، فلا بد من تجميع البيانات عن قيم المتوسط اليومي، ثم مقارنتها ببيانات محطة الأرصاد عن نفس الفترة الزمنية باستخدام تحليل إحصائى قائم على أساس القيم المتوسطة على مدار اليوم والساعة، وبالتعرف على التفاوت ما بين البيانات الميدانية وبيانات محطة الأرصاد على مدى ثلاثة أشهر، يمكن تعديل بيانات محطة الأرصاد عن الشهور الأخرى للتنبؤ بسرعة الرياح فى الموقع.

(٣) يتمثل البديل الثالث فى استقراء البيانات الميدانية، بأخذ القياسات على مدى سنة على الأقل، مع مناقشة قطان المنطقة المحليين، والتأكد من عدم وجود مواسم تهدأ فيها الرياح أو تهب بشكل استثنائى غير معتاد على مدار العام الذى أجريت خلاله القياسات.

### القدرة المنتجة من توربين الرياح:

تعطى القدرة المنتجة من توربين الرياح بالعلاقة:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p (\beta, \omega)$$

حيث تشير ن إلى الكسر من القدرة التى يستخلصها التوربين من تيار الرياح، وهى دالة فى سرعة الرياح والسرعة الزاوية للجزء الدوار  $\omega$  وزاوية الخطوة  $\beta$ ، وكذلك فى شكل السطح الانسيابى وعدد الريشات، ولما كان للسطح

الانسيابي قيمة مثلى بالنسبة لقوى الرفع والسحب لكل قيمة مفردة لزاوية الالتقاء  $\gamma$ ، أو على نحو مكافئ - لقيمة معينة لسرعة الرياح النسبية، فالكسر (ن) لتوربين رياح ذي عدد ريشات ثابت، يدور بسرعة زاوية ثابتة، سيكون له هو الآخر قيمة قصوى، تنقص إذا زادت أو قلت سرعة الرياح، وبالنسبة للأشكال الانسيابية الدارجة، تقع القيمة القصوى عندما تصل النسبة بين سرعة الريش الطرفية وسرعة الرياح إلى ما بين ٤، ٨.

ويتدخل - لدى اختيار عدد الريشات - العديد من العوامل: تكلفة الريشات وأجزاء نقل الحركة، مقدار القدرة المقتتصة من الرياح وسرعة الدوران، فالآلة ذات الريشة المفردة ستقتصص كمية طاقة أقل مما تفعل آلة ذات ريشات متعددة، إلا أنها ستدور بسرعة زاوية أعلى، ولأن الدوار سيشغل المولد بسرعة تتراوح ما بين ١٥٠٠، ١٨٠٠ لفة / دقيقة لتوليد القدرة الكهربائية عند تردد ٥٠ أو ٦٠ هرتز، فمن شأن سرعة زاوية أعلى للدوار أن تتيح استعمال أجزاء نقل حركة ذات نسب تخفيض سرعات تروس أقل، وهى أخف وزناً وأقل تكلفة وأقل فى الفاقد المهدر من الوصلات اللازمة فى حالة دوار ذي سرعة زاوية أقل.

والآلة ذات ثلاث ريشات أكثر قدرة على اقتناص الطاقة من الرياح، وأكثر استقراراً من حيث توجيهها فى مهب الريح، إلا أنها أعلى كلفة من حيث الريشات وأجزاء نقل الحركة.

ويبدأ توليد القدرة مع سرعة رياح قدرها ٣ أو ٤ م / ث (التي تبدأ عندها الحركة) والقدرة المعيارية القياسية  $Q$  **rated power** تنتج عند ١٠ م / ث، وإذا ما تجاوزت سرعة الرياح ٢٥ م / ث يتوقف التوربين عن العمل وقاية له من التلف، وتزيد القدرة المنتجة بنحو سبعة أضعاف إذا ما تضاعفت سرعة الرياح ويعنى هذا آلة ذات كفاءة مرتفعة.

وتصل أقصى قيمة لمعامل الأداء إلى ٠,٤٦ وذلك عند سرعة رياح ٨ م / ث تقريبًا، وهذه القيمة تبلغ حوالى ٧٨% من أقصى قيمة نظرية لهذا المعامل، وهى ٠,٥٩٣ وعلى ذلك فريش التوربين تكون فعلا ذات كفاءة عالية نسبيا فى مدى ضيق من ظروف التشغيل، رغم أن مجالا رحبًا لتحسين الأداء يظل فى حيز الإمكان.

ويحدد مردود القدرة المتوسطة ق م التى نحصل عليها من توربين الرياح للفترة الزمنية المعنية، بالقدرة الخارجة لدى سرعة ما للرياح مضروبة فى احتمالية حدوث هذه السرعة بعد إجراء عملية تكامل رياضى لها بالنسبة للسرعة عبر كل قيم سرعة الرياح الممكنة، ويمكن التعبير عن ذلك رياضياً بالمعادلة:

$$ق م = \int_{ع} ق غ (ع) د (ع) د ع$$

$$\text{وإذا ما عبرنا عن } ق غ = ق ر \times ج (ع)$$

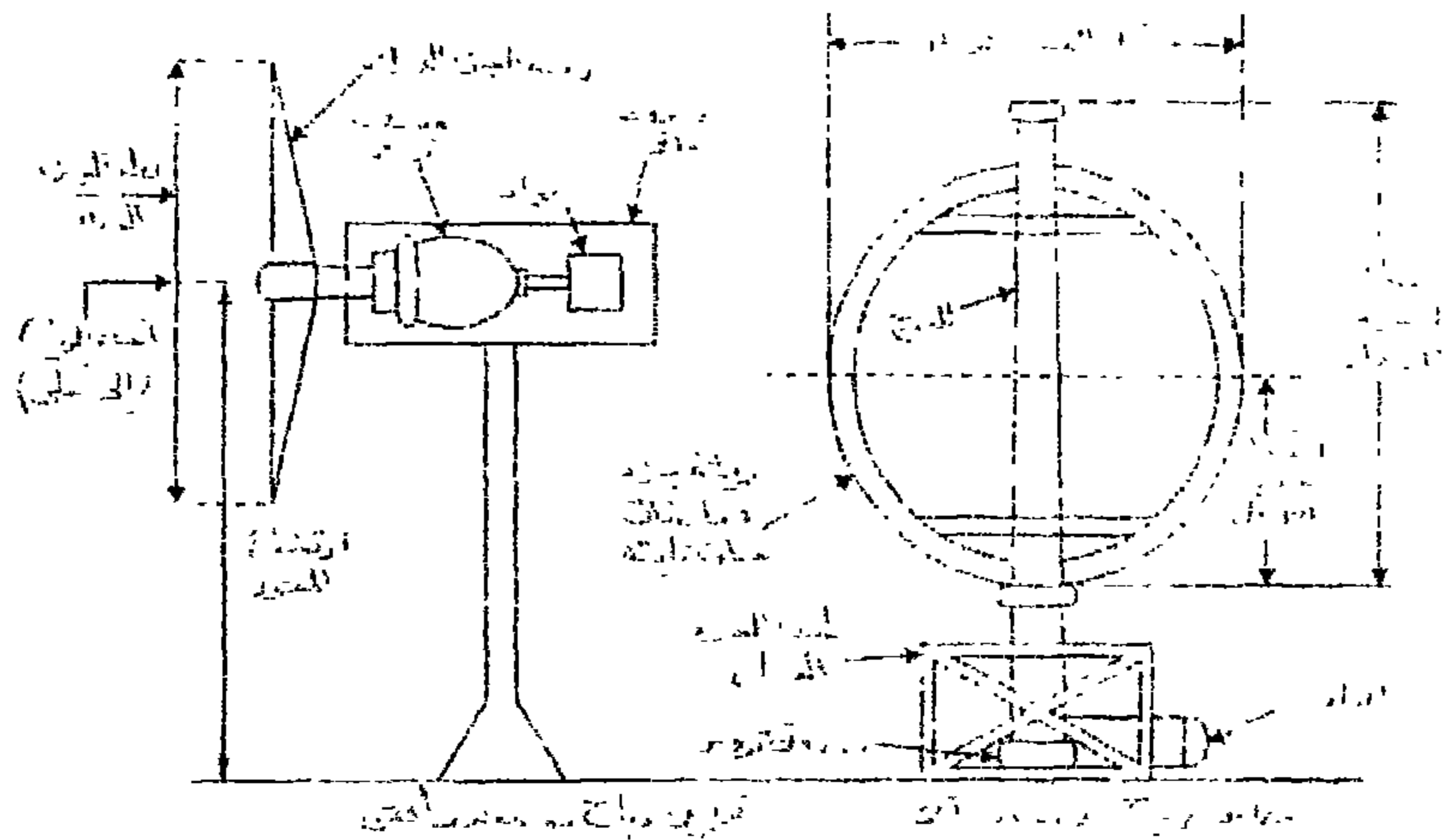
$$\text{فتكون } ق م = ق ر \int_{ع} ج (ع) د (ع) د ع$$

والمقدار موضوع التكامل هو النسبة ما بين متوسط القدرة السنوية الخارجة إلى القدرة المعيارية ق ر للتوربين، ويعرف هذا المقدار بمعامل السعة capacity factor، وهو مؤشر مهم يتم استعماله لحساب تكلفة الطاقة التى نحصل عليها من توربينات الرياح.

### توربينات الرياح:

هناك نوعان متمايزان من توربينات الرياح: الأول هو توربين الرياح ذو المحور الأفقى (HAWT)، والذى يكون محور دوران جزئه الدوار موازياً لاتجاه تيار الرياح، والثانى هو توربين الرياح ذو المحور الرأسى (VAWT) والذى يكون محور دوران جزئه الدوار عمودياً على اتجاه سريان الرياح، والنوعان بينهما

الرسم التخطيطي في شكل (١٠ - ١٢)، ومبين بالشكل كيفية تشغيل النوع الأفقي بالرياح المتجهة من أعلى ومن أسفل، وتعمل أغلب الآلات الحديثة بالرياح المتجهة إلى أعلى، وذلك تجنباً لأن يحجب البرج الرياح عن الريشات وهو ما يمكن أن يفضي إلى مستويات مزعجة من الضجيج ويزيد من الإجهادات المسلطة على الريشات، ومن الناحية العملية، يرتفع المحور بمقدار قطر الجزء الدوار تقريباً، أما في النوع ذي المحور الرأسي فيوضع صندوق التروس والمولد عند مستوى الأرض مما يسهل من إجراء الصيانة الروتينية، إلا أن ذلك يعيق الاستفادة من سرعات الرياح العالية ومن انخفاض اضطراباتها لدى الارتفاعات العالية.



شكل (١٠ - ١٢)

#### النوعان الأساسيان لتوربينات الرياح

وربما يثبت النوع ذو المحور الرأسي أفضلية من ناحية التكاليف، إلا أن استعماله محدود، فهو - على عكس النوع الأفقي لا يمكنه الاستفادة من سرعات الرياح العالية ومن انخفاض تقلباتها لدى الارتفاعات العالية، ومن ثم فالأغلب الأعم من توربينات الرياح المستعملة اليوم ذات محور أفقي.

## المنظومات الجانبية المساعدة لتوربينات الرياح:

يتكون توربين الرياح الحديث ذو المحور الأفقى من ست منظومات فرعية هي أساسًا:

(١) الجزء الدوار: والذي يتركب من ريشة أو ريشتين أو ثلاث مركبة على سرة أو محور، وقد يشتمل على منظومة كبج ديناميكي لدى الارتفاعات العالية ووسائل تحكم فى الخطوة.

(٢) أجزاء التشغيل أو الإدارة، وتتضمن صندوق التروس أو وسائل نقل الحركة، والنظم الهيدروليكية، وأعمدة الدوران ونظم الكبج وحجرة حماية الأجزاء المتحركة التى تحيط بأجزاء التوربين.

(٣) منظومة لتعديل اتجاه الدوار بحيث يكون متعامدًا مع اتجاه سريان الرياح.

(٤) الأجزاء الكهربائية والإلكترونية، والتى تشمل المولد، والمرحلات relays، وأنظمة فصل الدوائر الكهربائية، والكوابل المتداوية، والتوصيلات السلكية، ومنظومات التحكم والإلكترونيات، والمحسات.

(٥) البرج.

(٦) منظومة ضمان استقرار المحطة التى تشمل الطرق، وسائل تدعيم الأرضية ومعدات التوصيل ما بين الأجزاء.

## الجزء الدوار:

والدوار الذى يقوم بتحويل طاقة الرياح الحركية إلى طاقة دورانية هو الجزء المتميز والخرج فى توربين الرياح، فهو يتعرض لقوة الرياح بأكملها



ولكامل نطاق التغير فى سرعتها واتجاهها والاضطراب فى مقدارها وقصها shear (وهو التغير فى سرعة الرياح مع تغير المنسوب).

ويمكن توصيف الدوار بأنه جسم جاسئ ذو خطوة ثابتة (أو متغيرة يتحكم فيها عن طريق مقصورة خاصة)، للحد من أقصى قيمة للقدرة المنتجة من التوربين مع خطوة ثابتة أو متغيرة، ويستعمل الجزء الدوار كذلك للتحكم فى مقدار الطاقة المستخلصة من تيار الرياح، وعادة ما تستخدم أجزاء دوارة بريشات ذات خطوة متغيرة أو ريشات يتم التحكم فيها عن طريق مقصورة خاصة، ومع الخطوة المتغيرة يغير دوران الريشة حول محور ما على امتداد طولها، من زاوية الخطوة وبالتبعية من قوى الرفع والسحب المؤثرة على الريشة، ولا تحد الخطوة المتغيرة فقط من القيمة القصوى من الطاقة المقتنصة ولكنها تقلل بالمثل من السرعة اللازمة لبدء الحركة وتوفر وسيلة لكبح حركة التوربين بوسيلة أيروديناميكية (عن طريق الديناميكا الهوائية).

### مجموعة توصيل الحركة:

أهم أجزاء مجموعة توصيل الحركة أعمدة السرعات العالية والبطيئة، ونظام كبح الحركة الميكانيكى، والكراسى وصندوق التروس أو النقل، والغطاء الخارجى، وتزيد تروس مجموعة التوصيل من سرعة الجزء الدوار الدورانية والتي تصل عادة من ٠,٥ إلى ٢ هيرتز (من ٣٠ إلى ١٢٠ لفة / دقيقة) لتصل إلى سرعة دورانية، للعمود الخارجى مقدارها ٢٠ إلى ٣٠ هيرتز (من ١٢٠٠ إلى ١٨٠٠ لفة / دقيقة) وهى اللازمة لأغلب المولدات لتوليد القوة المحركة لدى تردد ما بين ٥٠ إلى ٦٠ هيرتز.

## جهاز التحكم فى الاتجاه:

تصنف توربينات الرياح الأفقية إلى فئتين: توربينات تندفع فيها الرياح إلى أعلى (حيث يقابل تيار الرياح الجزء الدوار أولاً) أو توربينات تندفع فيها الرياح لأسفل (حيث يلاقى تيار الرياح البرج أولاً) وتستعمل أجهزة التحكم فى توجيهه مستوى الدوار بحيث يتعامد مع اتجاه هبوب الرياح.

## المنظومات الكهربائية:

لكل توربينات الرياح الحديثة تقريباً مولدات تعمل بالحث، تتكون من هيكل ثابت ذو لفات من الأسلاك، وجزء دوار للمولد، وتتباين القدرة المحركة المنتجة من هذا النوع من المولدات بسرعة مع تغير الفرق ما بين تردد الخط والسرعة الزاوية لدوار المولد، وتصل القدرة المنتجة لقيمتها القصوى عندما يبلغ هذا الفرق أجزاءً من المائة فوق تردد الخط، وبهذا فإن السرعة الزاوية لدوار المولد محكومة بتردد الخط.

## الموقف الحالى لاستغلال طاقة الرياح بالهند وآفاقه المستقبلية:

بعد ثلاث سنوات من تأسيس "إدارة مصادر الطاقة غير التقليدية" عام ١٩٨٥، بدىء فى إنجاز برنامج قومى لاستغلال طاقة الرياح، وكان أحد برامج الوزارة الحالية لمصادر الطاقة غير التقليدية (التي تشكلت عام ١٩٩٢) هو برنامج "تقييم مصادر الرياح"، فنشطت جهود مسح الرياح ورصدها بعرض البلاد جميعها، بهدف قياس سرعات الرياح فى مواقع مختارة بمختلف الولايات، وتقييم مدى التغير الموسمى والسنوى، وبحلول ٣١ ديسمبر ١٩٩٢، كان هناك ٢٥١ محطة لمسح الرياح تباشر عملها فى ١٦ ولاية والمناطق الاتحادية فى جزر أندامان ونيكوبار وفى لاكشاد ويب، على حين يبلغ إجمالى عدد المحطات المستهدف إقامتها ٤٧٠ محطة، وبالمثل هناك ٨٨ محطة مراقبة رياح تباشر عملها فى ١٠ ولايات والمناطق الاتحادية فى جزر أندامان ونيكوبار ضمن عدد كلى مستهدف يبلغ ١٣٦ محطة:

جدول (١٠-١)

محطات رصد الرياح ومسحها (بالهند) في ٣١ ديسمبر ١٩٩٢

رقم مسلسل	الولاية أو المنطقة الاتحادية	عدد محطات رصد الرياح	عدد محطات مسح الرياح
١	جوجارات	١٦	٣٠
٢	تاميل نادو	٢٠	—
٣	راجستھان	٧	١٧
٤	كارناتاكا	٨	—
٥	ماھاراشترا	٦	٣٠
٦	أندھرا براديش	٧	٢
٧	كيرالا	٩	٣٠
٨	أوريسا	—	٣٠
٩	مادھيا براديش	٥	—
١٠	لاكاشاد ويب	٥	—
١١	أندامان ونيكوبار	٥	—
١٢	ھيما تشال براديش	—	٣٠
١٣	ميجهالايا	—	٧
١٤	أوتار براديش	—	٣٠
١٥	تريبورا	—	٩
١٦	البنغال الغربية	—	٦
١٧	أسام	—	٢٧
١٨	بيھار	—	٣
	الإجمالي	٨٨	٢٥١

ولقد أمكن بالتقييم الذى تم حتى الآن - التعرف على ٥٣ موقعًا سجل فيها متوسط سرعة رياح سنوى يتخطى حد ١٨ كم / ساعة، وتتوزع هذه المواقع على سبع ولايات:

(جدول ١٠-٢)

المواقع التى تتعرض لمتوسط سرعة رياح تتعدى ١٨ كم / ساعة على مدار السنة بالهند

م	الولاية أو المنطقة الاتحادية	متوسط سرعة الرياح السنوى كم /س	م	الولاية أو المنطقة الاتحادية	متوسط سرعة الرياح السنوى كم /س
١	<u>تاميل نادو</u>	١٩,٠	١	<u>لاكاشادويب</u>	١٨,٠
٢	سلطان بيت	٢١,٢		أجاثى	
٣	بولا فادى	١٩,١	١	<u>كارناتاكا</u>	
٤	أند يباتى	٢٠,٣	٢	جوكاك	١٩,٤
٥	كاياتهار	٢٥,٥	٣	مالجاتى	١٩,٢
٦	موباندال	٢١,٧	٤	كانامساجار	٢٠,١
٧	سيمباجرا مانبور	١٨,٩	٥	جوجيماتى	٣٠,٩
٨	بوليا نكولام	٢١,٤	٦	بوماناهالى	١٨,٧
٩	آلاجيا باندنيا بورام	٢٠,٨	٧	هانومانهاى	٢٠,٤
١٠	تالا ياتهو	٢١,٤		تلال بى بى	٢٧,١
	آييكودو			<u>آندھرا پراديش</u>	

۲۰,۴	تیرو مالا	۱	۲۳,۹	کاتادیمالای	۱۱
۲۰,۵	بایا لاکونتلا	۲	۲۴,۳	رامیسوارام	۱۲
۲۰,۲	ناراسیمها کوندا	۳	۲۲,۷	کیتھانور	۱۳
۲۴,۰	کاکولا کوندا	۴	۱۸,۴	میتوکادای	۱۴
۲۰,۰	سد ایم بی آر	۵	۲۰,۶	بونجالور	۱۵
۱۹,۷	راما جیری (۱)	۶	۲۱,۴	آراسا مبالایام	۱۶
۱۹,۱	بهیمو نیباتنام	۷	۲۳,۴	ایدیار بالایام	۱۷
۱۸,۳	راما جیری (۳)	۸	۱۸,۲	اوتابیدارام	۱۸
	<u>کیرالا</u>			<u>جوجارات</u>	
۲۲,۳	کانجیکودی	۱	۲۰,۰	هارشاد	۱
۱۹,۵	کوتاتھارا	۲	۱۹,۴	اوکھا	۲
۱۸,۴	کوتامالا	۳	۱۹,۴	موندرا	۳
۱۹,۷	بونمودی	۴	۱۹,۹	سوراجباری	۴
۳۰,۴	راما کالمیدو	۵	۱۹,۰	اوکھامادهی	۵
	<u>ماھارا شترا</u>		۱۹,۹	نافی باندر	۶
۱۹,۶	فیجا یا دورج	۱	۲۴,۲	دھانک - ۱	۷
۱۸,۲	بانشجانی	۲	۲۴,۹	دھانک - ۲	۸
۱۹,۹	تسالیکوادی	۳	۱۹,۲	دوکما	۹
			۲۱,۹	کالیانبور	۱۰
			۲۰,۵	باما نبوری (۲)	۱۱

المصدر: التقرير السنوى لوزارة "مصادر الطاقة غير التقليدية لعام ۱۹۹۲ - ۱۹۹۳".

وينظر إلى المواقع الواردة بجدول (١٠-٢) كأماكن مأمولة لإقامة مزارع رياح ذات ساعات كبيرة وتتميتها.

وتحت مظلة برنامج طموح أقيمت مجموعة من مضخات تعمل بالرياح وشاحنات بطاريات بالرياح، ومولدات كهربية مستقلة بذاتها تعمل بالرياح، ومزارع وسلسلة من المولدات الكهربائية تغذى الشبكة العمومية بالكهرباء وذلك للتدليل على قدرة هذه التقنية.

وقد أقيمت بالفعل حتى وقتنا الراهن أكثر من ٣٠٠٠ مضخة بالرياح تشغل بالفعل في مواقعها، وأغلب هذه المضخات من الطراز (12 PU500) وتستعمل المضخات التي تعمل بالهواء في تلبية احتياجات مختلف التطبيقات كالري ومياه الشرب، وأحواض الحصول على الملح من البحر، وزراعة البساتين وما إلى ذلك، ويوضح الجدول (١٠ - ٣) موقف المضخات التي تعمل بالرياح في الآبار العميقة والموصلة بمضخات تروس في ٣١ ديسمبر ١٩٩٣:

#### جدول (١٠-٣)

##### المضخات ذات التروس التي تعمل بالرياح

رقم مسلسل	اسم الولاية	عدد المضخات التي أقيمت		عدد المضخات تحت الإنشاء
		حتى ٣١ ديسمبر ١٩٩٢	حتى ٣١ ديسمبر ١٩٩٣	
١	أندهر ابراديش	١٠	١٠	-
٢	جوجارات	١٠	٢٠	١٠
٣	كارناتاكا	٢٠	٢٠	-
٤	كيرالا	١٥	٢٠	-

١	١٩	١٠	مادهيابر ادیش	٥
-	٣٠	٢٣	ماهار اشترا	٦
١	١٩	١٩	راجا ستهان	٧
-	٦٠	٦٠	تاميل نادو	٨
-	٢٠	٥	أوتاربر ادیش	٩
١٢	٢١٨	١٧٢	الإجمالي	

المصدر: وزارة مصادر الطاقة غير التقليدية - التقرير السنوي لعام ١٩٩٢ - ١٩٩٣

وقد أقيم حتى الآن ما يربو على ١٢٠ شاحنة بطارية تعمل بالرياح وبسعات تتراوح ما بين ٥٠ وات، ٤ كيلو وات، ونحو ١٧٥ مولدات كهرباء مستقلة بذاتها وتعمل بالرياح بسعات بين ١٠، ٢٥ كيلو وات، وفي الوقت الراهن أقيمت مزارع رياح بقدرة ٨٠ ميغاوات في ثمان ولايات، وتتبع نصف هذه المزارع القطاع الخاص، ويوضح جدول (١٠-٤) موقف مشاريع مزارع الرياح:

#### جدول (١٠-٤)

بيان مزارع الرياح وتوزيعها بين الولايات (بالهند)

رقم مسلسل	الموقع	القدرة المركبة فعلا ميغاوات	القدرات تحت الإشياء بالميغاوات
جوجارات			
١	لامبا	١٠,٠٠٠	٠,٢٠٠
٢	أوكها مدهي	٣,٣٠٠	-
٣	ماندفي	١,٤٩٠	-
٤	أوكها	٠,٦٠٥	٠,٤٩٥





كارائاتاكا			
١	٠,٥٥٠	٠	٠
٢	٠	٢,٠٠	٢,٠٠
الإجمالي	٠,٥٥٠	٢,٠٠	٢,٠٠
مادهيايراديش			
١	٠,٥٩٠	٠	٠
كيراالا			
١	٠	٢,٠٠٠	٢,٠٠٠
الإجمالي الشامل	٣٧,٢٤٥	٢,٦٩٥ (*)	٢,٦٩٥ (*)

المصدر: وزارة مصادر الطاقة غير التقليدية - التقرير السنوي ١٩٩٢ - ١٩٩٣

(\*) الرقم كما ورد بالأصل وصحته ١٢,٦٩٥ (المترجم)

## جدول (١٠-٥)

### البرنامج القومى لاستغلال طاقة الرياح المشروعات (الحكومية):

القدرة المركبة	٣٧,٨٢ ميجاوات
الطاقة المولدة خلال عام ١٩٩٢ - ١٩٩٣ (حتى ٣١ ديسمبر ١٩٩٢)	٤٢ مليون كيلو وات ساعة
الطاقة المولدة التراكمية (المجمعة) حتى ٣١ ديسمبر ١٩٩٢	١٥٦ مليون كيلو وات ساعة
قدرات تحت التنفيذ	١٢,٧ ميجاوات

### مشروعات القطاع الخاص:

القدرات المركبة (فى تاميل نادو)	٧,٥٢ ميجاوات
القدرة المولدة خلال عام ١٩٩٢ - ١٩٩٣ (حتى ٣١ ديسمبر ١٩٩٢)	١١ مليون كيلو وات ساعة
القدرة المولدة التراكمية (المجمعة)	٢٢ مليون كيلو وات ساعة
مشروعات مخطط لها فى تاميل نادو	٤١,٢٥ ميجاوات
فى كارانثاكا	٢٤,٠٠ ميجاوات
درجة إتاحة المولدات الكهربائية المشغلة بالرياح	٩٥%

المصدر: وزارة مصادر الطاقة غير التقليدية - التقرير السنوى ١٩٩٢ - ١٩٩٣

### استغلال طاقة الرياح:

ينتشر فى الوقت الحالى فى كثير من مناطق العالم بما فى ذلك الهند استخدام طواحين الهواء الصغيرة ذات الحركة الميكانيكية المباشرة والمقترنة بمضخة

ومستودع تخزين، ويمثل هذا آفاقاً مستقبلية لضخ المياه لأغراض الري ومياه الشرب وغير ذلك، في المناطق الريفية ذات سرعات الرياح المتوسطة أو المنخفضة وعلى وجه الخصوص في البلدان النامية، ولقد تطور العديد من تصميمات طواحين الهواء متعددة الريشات والمكونة بالكامل من المعدن، وشأنها شأن طواحين الهواء متعددة الريشات التقليدية فلها عزم دوران ابتدائي طيب ولكنها أخف وزناً وأيسر في تصنيعها ولها كفاءة أعلى قليلاً، ولقد طورت بالمثل طواحين هواء شراعية حديثة الطراز في كثير من البلدان من ضمنها الهند، وهناك تحت التنفيذ بالهند برنامج حكومي لضخ المياه بالرياح يشمل البلاد كلها، وقد جرت بالفعل إقامة أكثر من ٢٠٠٠ مضخة رياح، ويوفر البرنامج معلومات غاية في الأهمية عن التطورات التكنولوجية المستحدثة، كما يشجع بصورة محمودة تبادل المعلومات والتوسع في البرنامج بحيث يتيح استغلالاً على نطاق أوسع للرياح في مواقع بعينها.

وطاقة الرياح هي صورة عالية الجودة من الطاقة الميكانيكية التي يمكن تحويلها لطاقة كهربائية مع الحد الأدنى من الفاقد في الطاقة، وحيث إن الجزء الدوار من طاحونة الهواء يتحرك بصورة دورية (بمعدل دورة في كل ثانية تقريباً) فإن القدرة المولدة تحصل في صورة تيار متغير، إما باستخدام صندوق تروس وتثبيت سرعة الدوران أو بالسماح بالتغير في السرعة مع تحويل القدرة الكهربائية المولدة إلى التردد اللازم بوسيلة إلكترونية.

وتتراوح الاستخدامات ما بين استعمالات على نطاق صغير في المجتمعات الريفية والنائية، ومرتبطة بمحطات قوى أخرى، إلى توليد للكهرباء على نطاق كبير، تغذى بعده في شبكة المرافق العامة، وبالنسبة للوحدات القائمة بذاتها تلزم منظومة من وحدة ديزل احتياطية وبطارية تخزين طاقة لضمان استمرارية الإمداد في خلال فترات هدوء الرياح، ويمكن استغلال الرياح بالمثل في شحن البطاريات

باستخدام مولدات كهربائية من نوع التيار المستمر غير ذات الفرش brushless لإمداد المناطق المنعزلة بالقدرة الكهربائية، وكذلك محطات الأرصاد الجوية والمساعدة في شئون الملاحة والاتصالات وما شابه، والمنظومات المستقلة القائمة بذاتها، وشاحنات البطاريات التي تعمل بالرياح تنصب حاليًا في مختلف مناطق الهند، وتستغل في تطبيقات متنوعة.

ولقد وقع تطوير ملموس في نحو ١٧٠٠٠ مولد كهربائي يعمل بالرياح في ولاية كاليفورنيا بالولايات المتحدة، وتنتج هذه المولدات أكثر من ١٤٠٠ ميغاوات من القدرة المحركة التي تستخدم في مختلف المرافق، ولقد تيسر ذلك من خلال مفهوم "مزرعة الرياح" أو "بستان الرياح" الذي يشير إلى استغلال عدد من مولدات الكهرباء الرياحية في شكل مجموعة وحدات لتوليد القدرة ودمجها في شبكة موحدة، ومع نهاية عام ١٩٨٧ كما ذكر سابقًا انتجت هذه المولدات ١٤٠٠ ميغاوات، وقد بدأ بالفعل برنامج لتوصيل القدرة المولدة من الرياح بالشبكة العمومية في بعض الأقطار الأوروبية كالدانمارك وهولندا وألمانيا والمملكة المتحدة وسواها.

وقد بدأ برنامج المزارع الرياحية الحكومية بالهند عام ١٩٨٥، حيث بلغت القدرة المركبة حوالى ٨ ميغاوات في بحر عام ونصف منذ يونيو ١٩٨٦، وقد شمل ذلك إقامة سبعة مشروعات لمزارع الرياح إجمالى قدراتها ٦,٨٥ ميغاوات موزعة على ١١٠ آلة تقع في أوكها وماندفي بولاية جوجارات، وفي توتيكورين وكاياتار بتاميل نادو، وبورى بأوريسا، وديوجاره بما هاراشترا، وتالكايڤيرى بكارناتاكا، وفيما عدا بعض المصاعب الفرعية، فقد حققت هذه المشروعات نتائج طيبة.

## التكلفة النمطية لإنتاج الطاقة من الرياح (في الهند):

عادة ما تتم مقارنة تكلفة منظومات المضخات الرياحية، بالمضخات العاملة بالديزل، وعلى أسس معينة مفترضة فيما يخص التكلفة الرأسمالية وتكلفة الصيانة السنوية. والإهلاك، وأسعار الفائدة، فقد حسبت تكلفة المتر المكعب الواحد من الماء الذى يضخه كل من الأسلوبين لمنظومة نمطية للضخ بالرياح مثل الطراز 500 - PU - 12 على أساس الخبرة الميدانية العملية فى الهند، فالمنظومة تكلفتها ٢١٠٠٠ روبية هندية ( نحو ١٥٠٠ دولار)، قادرة على ضخ ٢٠٠٠٠ م<sup>٣</sup> من الماء سنويا تحت ساقط مياه قدره ٦ م وسرعة رياح متوسطها ١٠ - ١٢ كم/س، تبلغ تكلفة ضخ المياه ٢٣,٥ بریز (\*) لكل م (١,٥ سنت أمريكى لكل م)، ومقابل ذلك تصل تكلفة ضخ المياه باستعمال وحدة ديزل قدرتها ٥ حصان تعمل لمدة ١٥٠٠ ساعة فى العام ولنفس السعة السنوية الكلية ونفس الساقط، إلى ٤٢,٥ بریز/م (\*\*). ( نحو ٢,٨ سنت أمريكى لكل م ) (\*\*\*) والمقارنة بالمضخات التى تشغل بالكهرباء تبين بالمثل أن ضخ المياه بقدرة الرياح وتحت ظروف رياح مواتية تقل عن التكلفة فى حالة المضخات الكهربائية.

وتتضمن اقتصاديات توربينات الرياح إدخال عامل اقتصاديات الحجم، بما يعنى أن معدل توليد الطاقة يتناسب مع المساحة الممسوحة ومكعب سرعة الرياح، وبالعكس... تعنى زيادة الحجم زيادة التعقدات والتراكبات التقنية، ومتوسط التكلفة الرأسمالية، وتكلفة توليد الطاقة للمشروعات ذات السعة ١ ميجاوات المنفذة فى الهند حتى الآن تتراوح ما بين ١,٥، ١,٧٥ كرور (\*\*\*\*) Crores روبية لكل

---

(\*) البریز Praise: عملة هندية تعادل ٠,٠٦٦ سنت أمريكى تقريباً (المترجم)

(\*\*) كما ورد بالأصل.

(\*\*\*) كما ورد بالأصل.

(\*\*\*\*) الكرور فى نظام الأعداد الهندى عدد يساوى ١٠ ملايين (المترجم)

ميجاوات، ١,٢٥، ١,٥٠ روبية لكل كيلو وات ساعة على الترتيب، اعتمادًا على الموقع، وتتراوح تكلفة توليد الطاقة المخطط لها لمزارع الرياح المقترحة ذات السعة ٥ - ١٠ ميجاوات ما بين ٠,٧٩، ١,٠٤ روبية / كيلو وات ساعة، ولمزارع الرياح الأكبر حجمًا تقل تكاليف توليد الطاقة أكثر، وتقف هذه التكلفة على مستوى المقارنة مع تلك الخاصة بتوليد الطاقة حراريًا وتقل عن تكلفة توليد القدرة من وحدات الديزل، وعلاوة على ذلك ففي حين أن تكلفة توليد الطاقة حراريًا ستوالى الارتفاع، مع توالى الزيادة فى أسعار الوقود، ستميل تكاليف توليد الطاقة بالرياح إلى التقلص أكثر وأكثر مع التحسينات المدخلة على تقنيّتها، ومع استكشاف مواقع ذات سرعات رياح أعلى، وكذلك مع زيادة حجم مشروعات مزارع الرياح.



**الباب الحادى عشر**

**الطاقة من المصادر الحيوية**





## مقدمة:

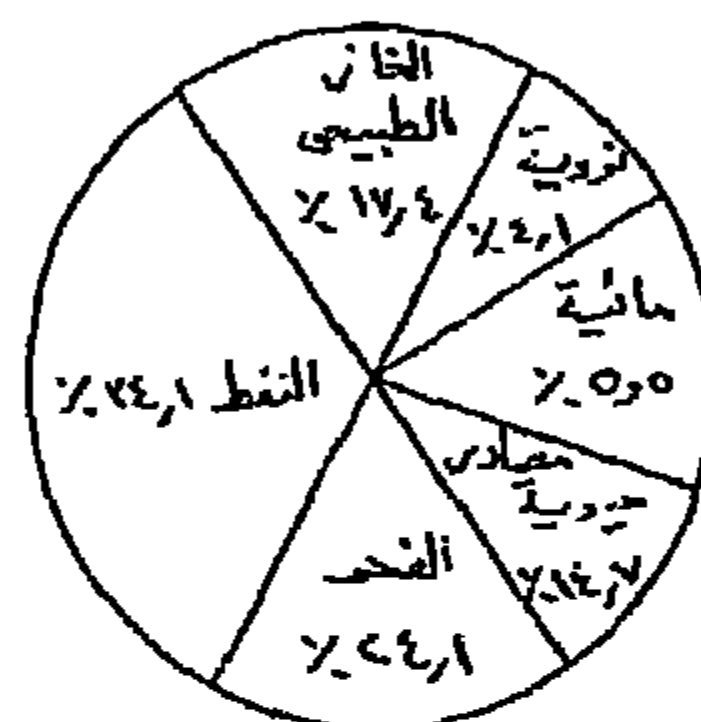
طالما استخدم الناس الطاقة الشمسية المستمدة من مصادر حيوية لأغراض الطهي والتسخين.

وحتى اليوم فإن الأغراض الغالبة على استخدام خشب الوقود في العالم هي الطهي والتسخين في المناطق الريفية من البلاد النامية، وتمثل الطاقة من المصادر الحيوية حوالي ١٥% من الطاقة المستهلكة على مستوى العالم، ٣٨% من مجمل استخدامات الطاقة في البلاد النامية (انظر شكل ١١ - ١)، وإن كانت الكفاءة تعوز معظم عمليات استغلال الطاقة من المصادر الحيوية.

إجمالي العالم = ٣٧٣ إكساجول (\*)  
الطاقة المستهلكة للفرد = ٧٧ جيجاجول  
التعداد = ٤,٨٧ بليون نسمة

شكل (١١ - أ)

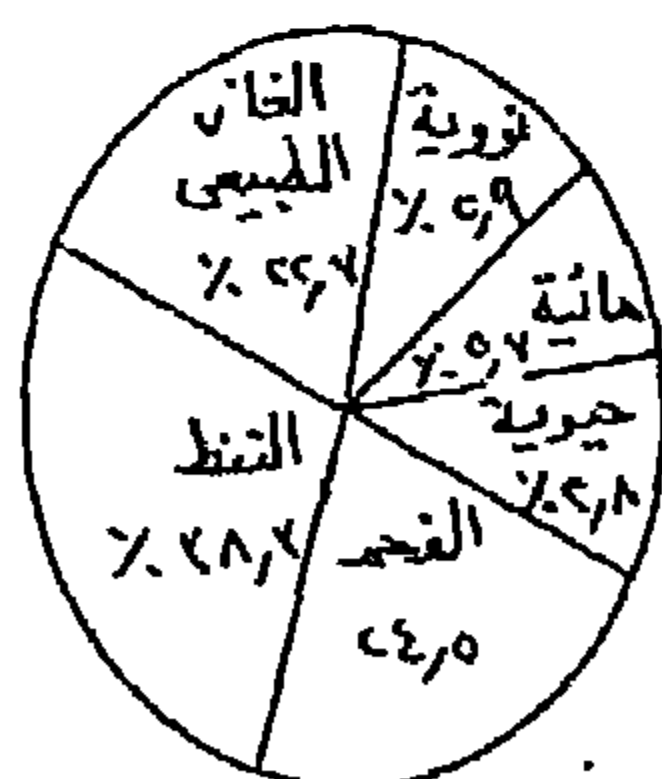
توزيع مصادر الطاقة الأولية عام ١٩٨٥  
لإجمالي العالم



إجمالي الطاقة المستهلكة = ٢٤٧ إكساجول  
(٦٦% من إجمالي العالم)  
استهلاك الفرد من الطاقة = ٢٠,٢ جيجا جول  
التعداد = ١,٢٢ بليون نسمة

شكل (١١ - ب)

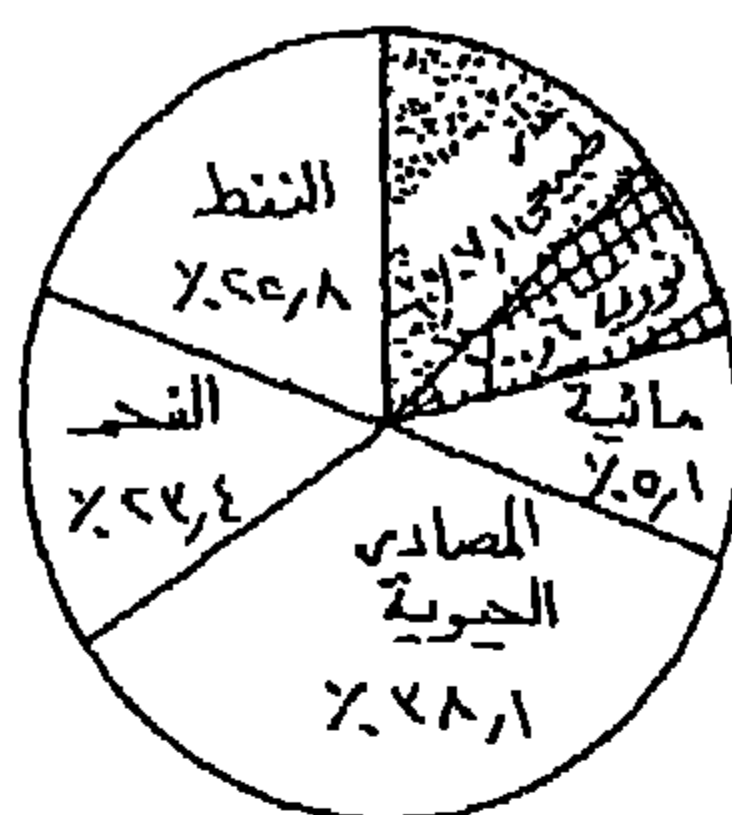
توزيع مصادر الطاقة الأولية عام ١٩٨٥  
للبلدان الصناعية



إجمالي الطاقة المستهلكة = ١٢٦ إكساجول  
(٣٤% من إجمالي العالم)  
استهلاك الفرد من الطاقة = ٣٥ جيجاجول  
التعداد = ٣,٦٥ بليون نسمة

شكل (١١ - ج)

توزيع مصادر الطاقة الأولية عام ١٩٨٥  
للبلدان النامية



شكل (١١ - د)

توزيع مصادر الطاقة الأولية عام ١٩٨٥

(\*) ١ إكساجول = ١٠<sup>١٨</sup> جول (المترجم)  
١ جيجاجول = ١٠<sup>٩</sup> جول (المترجم)

وتشير منظمات التغذية والزراعة التابعة للأمم المتحدة إلى أن الطاقة من المصادر الحيوية يتم استهلاكها بمعدل يصل إلى زهاء ٢٠ إكساجول على مستوى العالم في السنة، وهو ما لا يصل إلى ٦% من الاستهلاك الكلي للطاقة، على أية حال، فإن المسح التفصيلي في كثير من البلدان يؤول إلى نسب مئوية أعلى، وتشير أفضل التقديرات إلى أن الطاقة من مصادر حيوية تستهلك بالفعل بمعدل ٥٥ إكساجول في العام، أي ١٥% من استهلاك الطاقة عالميًا.

ومصادر الطاقة الحيوية هي السائدة في الدول النامية حيث يحيا نحو ثلاثة أرباع سكان المعمورة، وفي بعض البلدان النامية تشكل الطاقة من مصادر حيوية ٩٠% من الطاقة الكلية، وتستخدم هذه الطاقة بالمثل في بعض البلدان الصناعية كالولايات المتحدة (٤%)، والنمسا (١٠%)، والسويد (٩%).

ويكشف تحليل سيناريو الطاقة بالهند عن أن المصادر الحيوية هي واحدة من أكثر الصور المباشرة للطاقة المتجددة التي تلائم الظروف السائدة بالبلاد على الصعيدين الاجتماعي والاقتصادي، وتمثل طاقة المصادر الحيوية مصدرًا متجددًا ونظيفًا، فهي بديل مرغوب بحق، وعلى ذلك فإن المصادر الحيوية البرية (البقايا العضوية والنباتات العليا)<sup>(\*)</sup>، والمصادر الحيوية المائية (نباتات المياه العذبة، والحشائش البحرية والطحالب البحرية الدقيقة، والنباتات البحرية الطافية، والكائنات التي تتحمل الملوحة العالية)، تستأثر بقدر كبير من العناية في أي برنامج لتطوير مصادر الطاقة، وبخاصة في بلد كالهند، وربما عاون التعويل بدرجة أكبر على الطاقة الحيوية، على المحافظة على نظافة البيئة، فالنباتات تستعمل لنموها غاز ثاني أكسيد الكربون، ومن هنا فمصادر الطاقة الحيوية مقبولة بيئيًا، ويتضمن استعمال الطاقة الحيوية للتنمية على نطاق أوسع حدًا أدنى من الإخلال بالتوازن

---

(\*) النباتات العليا vascular, tracheophytes or higher plants هي طائفة النباتات التي لنسيجها تركيب خاص يسمح بتوصيل الماء والغذاء (المترجم)

البيئي ويمدنا بوسيلة لإعادة تدوير المواد الغذائية وثاني أكسيد الكربون من الجو، وهناك أسباب إضافية تحبذ الاعتماد على المصادر الحيوية كمصدر للطاقة وبصورة خاصة في بلد نام كالهند، نتلخص فيما يلي:

- المصادر الحيوية متاحة بصورة أكثر من الوقود الأحفوري بما لا يقاس، ويمكن بحسن القيام على إدارة عمليات تحويلها، أن تصبح مصدرا متجددا لا ينضب.

- يمكن ابتكار وسائل حديثة لاستخلاص الطاقة من المصادر الحيوية بتكاليف تنافسية.

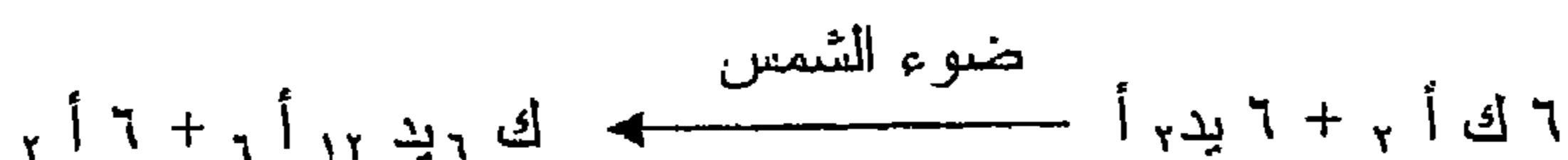
- الطاقة من المصادر الحيوية مع تحديث أساليب استغلالها تقدم أساسا طيبا للتنمية الريفية وتشغيل العمالة في الدول النامية.

- التوسع في استخدام الطاقة من المصادر الحيوية في الدول النامية في الأراضي التي تدهورت درجة جودتها أو التي أزيلت منها الغابات قد تمثل آلية يمكن بموجبها تمويل استصلاح مثل هذه الأراضي.

- بالتوسع في استخدام الطاقة الحيوية بطريقة متواترة، يؤدي إنتاجها واستعمالها إلى انعدام تراكم ثاني أكسيد الكربون في الجو، فثاني أكسيد الكربون المنبثق من الاحتراق تعادله كميات ثاني أكسيد الكربون المستخلص من الجو في عمليات التمثيل الضوئي.

### عملية التمثيل الضوئي:

في عملية التمثيل الضوئي تمتص مادة الكلوروفيل في بلاستيدات خلايا النباتات الخضراء ضوء الشمس، فتستخدمه في إنتاج الكربوهيدرات من الماء (يد<sup>٢</sup>أ) وثاني أكسيد الكربون (ك أ<sup>٢</sup>) المستخلص من الجو، والعملية تمثلها المعادلة.



وهكذا فإن ستة جزيئات من المياه وستة جزيئات من ثاني أكسيد الكربون تتحد معا منتجة جزيئا واحدا من الجلوكوز (المركب الكربوهيدراتي) وستة جزيئات من الأكسجين، وعلى مستوى العالم تفرز عملية التمثيل الضوئي ما يقدر بحوالي ٢٢٠ بليون طن مكافئ من المادة الحيوية في صورة جافة سنوياً، تتأخر عشرة أمثال قيمة الطاقة التي يستعملها العالم.

### كفاءة عملية إنتاج المادة الحيوية:

وتعني كفاءة تحول الطاقة الشمسية الساقطة إلى طاقة كيميائية تختزن في كربوهيدرات النبات. ويمكننا تقدير أقصى كفاءة من الاعتبار النظرية، فالنباتات تستخدم الضوء ذا الطول الموجي الذي يتراوح ما بين ٠,٤، ٠,٧ ميكرون (الضوء المرئي) وهو المعروف باسم الإشعاع المفضل للتمثيل الضوئي، والمركبات الضوئية النشطة بالنسبة للتمثيل الضوئي تقتصر نحو ٨٠% من هذا الإشعاع الفعال، في حين تفقد البقية بالامتصاص والانعكاس والانتقال خلال المواد التي لا تقوم بالتمثيل الضوئي، ويلزم ثمانية فوتونات من الإشعاع الفعال - كحد أدنى - لإنتاج الجلوكوز لكل جزيء يتحول من ثاني أكسيد الكربون، والطاقة المناظرة التي تختزن في الجلوكوز الناتج تتأخر ٢٨% من طاقة هذه الفوتونات الضوئية، ويستهلك زهاء ٤٠% من الطاقة المخزنة عن طريق التمثيل الضوئي خلال عملية تنفس النبات في الظلام، والتي هي عكس عملية التمثيل الضوئي، والتي تلزم كي يقوم النبات بعملياته الحيوية من بناء وهدم داخل خلاياه، وبأخذ كل هذه الاعتبارات في الحسبان يمكننا حساب أقصى كفاءة لعملية التمثيل الضوئي على النحو التالي:

$$100 \times 0,50 \times 0,80 \times 0,28 \times 0,60 = 6,7\%$$

وتتطبق هذه القيمة القصوى للكفاءة على النباتات رباعية الكربون  $c_4$  plants (وأول نواتج التمثيل الضوئي فيها هو سكر رباعي الكربون) مثل الأذرة، والسرغوم<sup>(\*)</sup> وقصب السكر، أما بالنسبة للقمح والأرز وفول الصويا والأشجار وسواها من النباتات ثلاثية الكربون (وأول نواتج التمثيل الضوئي فيها هو سكر ثلاثي الكربون) فتمثل ٩٥% من مصادر النبات الحيوية على مستوى العالم، وأقصى كفاءة للتمثيل الضوئي بها أقل، وتفقد النباتات ثلاثية الكربون خلال التنفس الضوئي حوالي ٣٠% إلى ثاني أكسيد الكربون المثبت سلفاً، وهذه النباتات غير قادرة على استغلال ٣٠% من الضوء الذي تمتصه المركبات النشطة من ناحية التمثيل الضوئي، لأن النباتات ثلاثية الكربون تنسحب بالضوء عند مستوى شدة ضوء أقل من حالة النباتات رباعية الكربون، ومن ثم فإن أقصى كفاءة لتحويل الطاقة بالنسبة للنباتات ثلاثية الكربون هي  $٠,٧ \times ٠,٧ \times ٦,٧ = ٣,٣\%$

وتؤثر درجة الحرارة بالمثل في عملية التمثيل الضوئي، والنباتات ثلاثية الكربون تصل لأقصى معدل لهذه العملية حين تتراوح درجة الحرارة بين ٢٠، ٣٠ درجة مئوية، ولجذور هذه النباتات القدرة على الوصول إلى ما يكفي من ماء العناصر الغذائية، ولكن التمثيل الضوئي يتوقف بها عندما تهبط درجة الحرارة إلى ما بين ٥، ١٠ م.

وعلى النقيض من ذلك تبلغ النباتات الاستوائية - بما فيها النباتات رباعية الكربون - أقصى المعدلات عندما تقع درجة الحرارة ما بين ٣٠، ٤٠ م، ويتوقف التمثيل الضوئي بها ما بين ١٠، ١٥ م.

---

(\*) السرغوم أو الدخن الهندي sorghum نبات ذو أنواع متعددة شبيه بالأذرة، يزرع كعلف أو لإعداد شراب كثيف القوام حلو المذاق (المترجم)

## توابع ارتفاع مستوى ثاني أكسيد الكربون وتأثيره على إنتاج المصادر الحيوية:

تشمل تداعيات ارتفاع نسبة ثاني أكسيد الكربون على إنتاج المصادر الحيوية ما يلي:

(١) من شأن تركيز ثاني أكسيد الكربون بالنسبة لأكسجين التنفس الضوئي *photorespiration* أن يقلل من عملية التنفس الضوئي لصالح عملية التمثيل الضوئي.

٢ - تحتفظ النباتات بالنسبة الأكبر من الكربون في أجزائها تحت سطح الأرض أكثر من نسبته في أجزائها فوق سطحها، وهذا التوزيع قد يعادل - جزئياً - الفوائد التي نحصل عليها من محاصيل الطاقة من مصادر حيوية والمتمثلة في التمثيل الأسرع لثاني أكسيد الكربون.

(٣) كفاءة استعمال الماء، سواء في النباتات ثلاثية أو رباعية الكربون ستزداد بارتفاع نسب ثاني أكسيد الكربون (تناسب الاحتياجات من المياه عكسياً مع كفاءة استعمال الماء والمقيسة بمليجرامات ك أ ٢ المثبتة في التمثيل الضوئي لكل جرام من ماء النتح *transpiration*\*)، فلو افترضنا أن ثاني أكسيد الكربون في الجو قد تضاعف، فسينخفض نتح الماء بمقدار ٣٠ أو ٤٠% لكل وحدة مساحات من سطح أوراق النبات بنوعيه، في حين سيرتفع معدل التمثيل الضوئي بنسبة ٣٠% للنباتات ثلاثية الكربون، وبنسبة لا تذكر بالنسبة للنباتات رباعية الكربون، فإذا أخذنا في الحسبان كلا العاملين، فينبغي أن ترتفع كفاءة

---

(\*) يقصد بعملية النتح *transpiration* رشح الماء خلال أنسجة أوراق النبات (المترجم)



استعمال الماء بنسبة ٧٥% للنباتات ثلاثية الكربون، ٣٥% للنباتات رباعية الكربون.

٤) الكثير من النباتات ثلاثية الكربون التي تنمو في ظل ظروف نقص في المواد المغذية لها تبدى ميلا للنمو الأسرع إذا ما زاد تركيز ثاني أكسيد الكربون.

وينبغي أن يؤخذ في الاعتبار أيضاً تأثيرات التغير في درجة الحرارة ونسبة الرطوبة، والذي يجلبه ارتفاع ثاني أكسيد الكربون المنبعث، على إنتاج المادة الحيوية، ولسوء الحظ لا يعرف اتجاه هذه التأثيرات. وكمحصلة، تشير الدلالات إلى أن رفع نسب ثاني أكسيد الكربون قد يدعم نمو المادة الحيوية بما يزكى استخدامها كمصدر للطاقة.

### تطوير مصادر المادة الحيوية:

استزراع المواد الحيوية بهدف الحصول على طاقة: يمكن توفير المادة الحيوية - كمادة خام للحصول على الطاقة إما بتكثيف زراعات الأشجار ذات الدورة القصيرة، أو باستزراع النباتات العشبية، والنباتات العشبية إما أن تكون حشائش ذات سيقان غليظة مثل السرغوم وقصب السكر أو ذات سيقان رفيعة مثل الدخن العسوى(\*).

وينبغي العناية بمحاصيل المادة الحيوية المزروعة بهدف الحصول على الطاقة كالعناية بالمحاصيل الزراعية، ويمكن أن تحصد محاصيل الزراعات ذات الدورة القصيرة كل ٣ - ٨ سنوات مع إعادة الاستزراع كل ١٥ - ٣٠ سنة،

---

(\*) الدخن العسوى switchgrass نبات عشبي معمر ينتمي لجنس الدخن من الفصيلة النجيلية وموطنه الأصلي أمريكا الشمالية وهو أحد محاصيل الطاقة الواعدة (المترجم)

وبالنسبة للحشائش المعمرة على مدار العام من شأن الحصاد أن يتم كل ٦ - ١٢ شهراً، في حين يعاد الاستزراع مرة في كل عقد.

ويوجد حالياً نحو ١٠٠ مليون هكتار<sup>(\*)</sup> من الأراضي على مستوى العالم مزروعة بالأشجار خصيصاً للأغراض الصناعية، هي في الأغلب أشجار بطيئة النمو توجه لأسواق منتجات الغابات التقليدية، وهناك أراض تقدر مساحتها بحوالى ٦ مليون هكتار متاحة لاستزراع الأشجار الصنوبرية ذات الخشب الصلب، وهو أنسب الأنواع في الأسواق للحصول على الطاقة.

وبناء على تقرير من اللجنة الوطنية لدراسة أخشاب الوقود أعد عام ١٩٨٢، فقد حسبت احتياجات الهند الإجمالية من أخشاب الوقود، وقدرت بزهاء ١٣٣ مليون طن، في حين أن المتاح سنوياً هو ٤٩ مليون طن، ومن ثم فقد بينت الدراسة أن هناك فجوة هائلة ما بين الطلب والمعروض من خشب الوقود، وهى الفجوة التى تتزايد يوماً بعد يوم، ولسد هذه الفجوة أشارت هيئة الزراعة الوطنية بضرورة تخصيص مساحة سنوية مقدارها ٢٠ مليون هكتار لهذا الغرض.

وإلى جانب القطاع الريفى، هناك استهلاك لا يستهان به من خشب الوقود فى المدن الحضرية الرئيسية بالهند، وقد أنشأت إدارة مصادر الطاقة غير التقليدية سلسلة من المراكز البحثية فى البلاد للبحث عن مصادر الطاقة الحيوية وأنجزت بالفعل عدة دراسات فى تلك المراكز، وأهمها مركز NBRI بلوكناو، وجامعة مادوراي كامراج بمادوراي، وجامعة جارھوال، وجامعة راجستھان الزراعية، وتتضمن الدراسات التى تجرى بهذه المراكز اختيار نوعيات النباتات سريعة النمو ذات الدورات الطويلة، وإقامة المزارع التجريبية لتقييم المردود المتوقع تحت ظروف زراعة أشجار الغابات المختلفة، بما فى ذلك تقييم الزراعة اقتصادياً،

---

(\*) الهكتار: وحدة مساحة تعادل ٢,٣٨ فدان (١٠٠٠٠ متر مربع) (المترجم)

ومكافحة الآفات وتصميم شبكات الري، وتنويعات التركيب المحصولي، وزراعة أكثر من محصول في الأرض نفسها (في صفوف متبادلة).

وهناك عدد كبير من نوعيات النباتات سريعة النمو تم التعرف عليها مما يمكن استزراعها في الأراضي القاحلة، إلا أنه لم يتم بالفعل إلا استزراع القليل منها مثل الأوكالبتوس(\*) واللوكاينا(\*\*) والأكاسيا والجازورينا.

وفي سبيل انتقاء أفضل النوعيات المبشرة كخشب وقود تحت الظروف الجوية والزراعية المتباينة، بدأت إدارة مصادر الطاقة غير التقليدية بالفعل برنامجًا مكثفًا لأعمال الدراسة والتطوير مع التركيز على المحاور الثلاثة التالية:

- (١) توصيف تفصيلي لخواص التربة.
- (٢) إجراء القياسات لمعدلات نمو النباتات.
- (٣) تقييم كميات الطاقة المتحصل عليها من التجارب على النوعيات المختلفة.

### تحويل الطاقة من مصادر الطاقة الحيوية:

بقدر تنوع مصادر الطاقة الحيوية، بقدر ما تتنوع تكنولوجيات تحويلها، وقد استخدم لمدة طويلة الحرق المباشر للمواد الحيوية وتحويلها إلى غاز، ولم تطور

---

(\*) الأوكالبتوس Eucalyptus: شجر ذو أوراق عطرية يستخرج منه زيت يستخدم لأغراض طبية ويستخدم خشبه في الصناعة (المترجم)

(\*\*) اللوكاينا Leucaena: طائفة نباتات ذات زهر أبيض ينتشر وجودها في جنوب الولايات المتحدة وبيرو (المترجم)

التكنولوجيات الأخرى كالتخمير والتحلل بالحرارة لأغراض استخلاص الطاقة، ولكنها حورت لإنتاج أنواع الوقود السائل لكى يحل محل الوقود الأحفوري الأولي، وبصفة عامة يمكن تصنيف استخدامات الطاقة من المصادر الحيوية إلى:

(١) الاحتراق المباشر (لأغراض الطهي والتسخين وتشغيل المراجيل باستخدام الخشب إما بصورته الأولية أو كخشب جاف torrefied أو باستخدام الفحم النباتي).

(٢) التحويل إلى غاز بقدرة منقولة عبر عمود shaft power أو بتسليط حرارة.

(٣) التوليد المشترك (غازات من التحلل بالحرارة تستخدم كمصدر حرارى فى عمليات التصنيع الزراعى والفحم النباتي كمنتج ثانوى أو العكس بالعكس).

وفى كل البلاد تقريباً التى يلعب فيها الوقود الحيوى دوراً ذا أهمية نسبية، يسود الطلب على وقود الخشب للأغراض المنزلية، وفى هذه الاستخدامات المنزلية ما يزال الفحم هو الوقود المفضل والرئيسى بفضل خواصه المعروفة جيداً.

ويستخدم التحلل اللاهوائى للمواد العضوية الحيوية لإنتاج الغاز الحيوى الآن فى إطار برنامج وطنى قومى بالهند أخذاً فى الحسبان تطبيق تقنيات تحويل المواد الحيوية الحديثة والإفادة منها على مجال واسع، وسنصف فيما يلى بعض برامج تحويل المادة الحيوية بالهند.

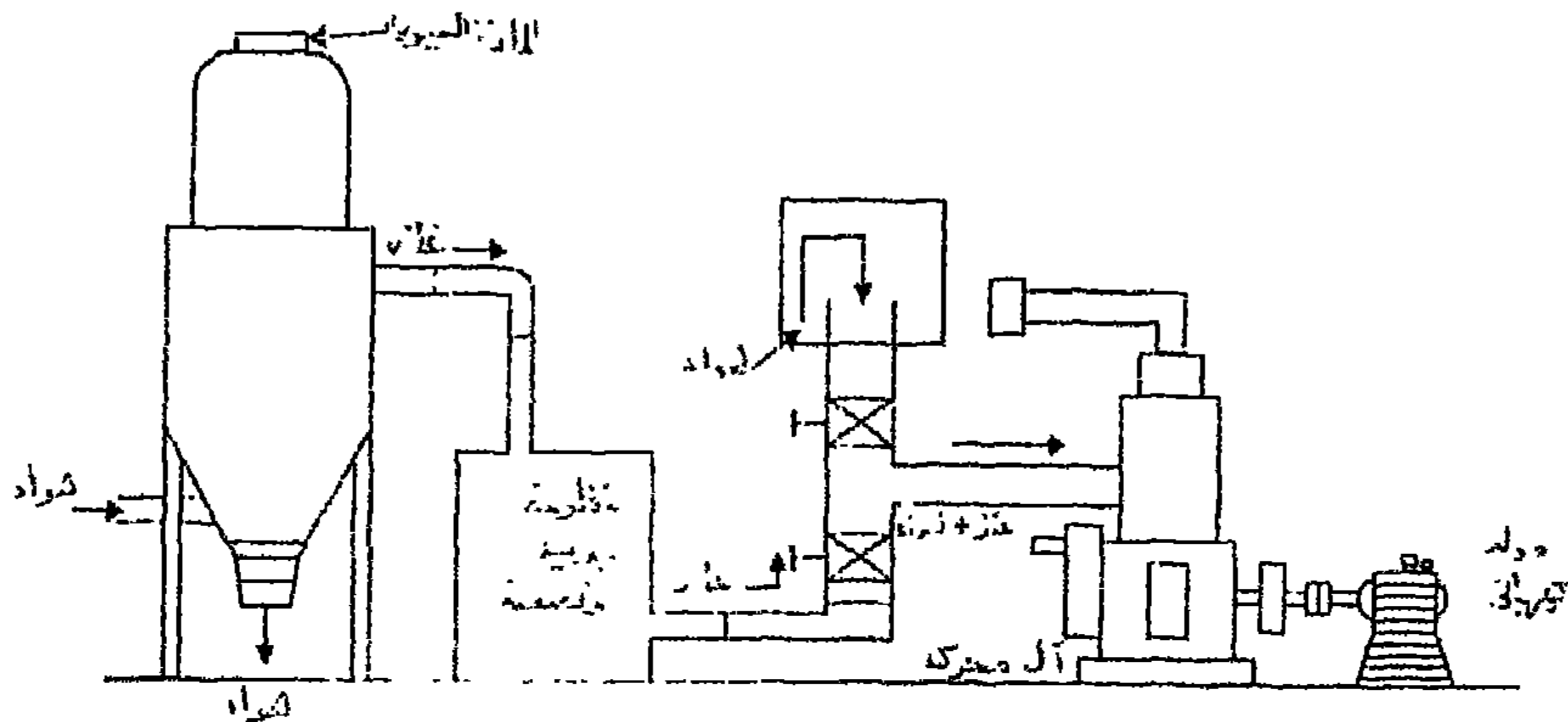
### التحويل للحصول على طاقة:

تمثل كهربة الريف أحد الدعامات الأساسية فى البنية التحتية لتنمية المناطق الريفية، وفى برامج التنمية الريفية يجرى التركيز على كهربة القرى واستعمال الكهرباء فى تشغيل المضخات، ويتم التركيز فى الوقت الراهن على الإسراع فى برنامج تطوير لنوعية الأحمال، وبصفة خاصة كهربة الأجهزة المنزلية، وبالنظر

إلى تكلفة تشغيلها الزهيدة وعدم تخلف آثار بيئية سلبية عنها وما تحققه من اللامركزية المطلوبة في إنتاج الطاقة، فإن المصادر الجديدة والمتجددة تقدم آفاقاً رحبة في مجال كهربة المناطق الريفية، وفي المقدر استعمال الكهرباء المنتجة من هذه المصادر بحيث تلبي الاحتياجات الأساسية، كالإنارة والشرب والرى والصناعات الزراعية، ومن الممكن أن يسهم توليد القدرة من النباتات المستزرعة لذلك إسهاماً فعالاً في بانوراما الطاقة بالريف، فهي بديل واعد لتلبية قسم كبير من الطلب على الطاقة.

### تحويل المادة الحيوية إلى غاز:

يساعد تحويل المادة الحيوية على الحفاظ على زيت البترول، ومن بين التقنيات المتنوعة، تتفرد هذه التقنية بتقديم آفاق واعدة، ويمكن الاعتماد عليها لسهولة تشغيل مضخات الرى وحتى الصغيرة منها ذات القدرة ما بين ٥، ١٠ حصان، وتتلاءم تقنية تحويل المادة الحيوية لغاز مع المناطق النائية التي يتعذر تزويدها بالقدرة المحركة عبر خطوط النقل المعتادة، ففي مثل هذه المناطق تتيح تقنية تحويل المادة الحيوية لغاز مصدراً رخيصاً للطاقة (شكل ١١ - ٢).



شكل (١١ - ٢)

رسم تخطيطي لعملية تحويل المادة الحيوية إلى غاز

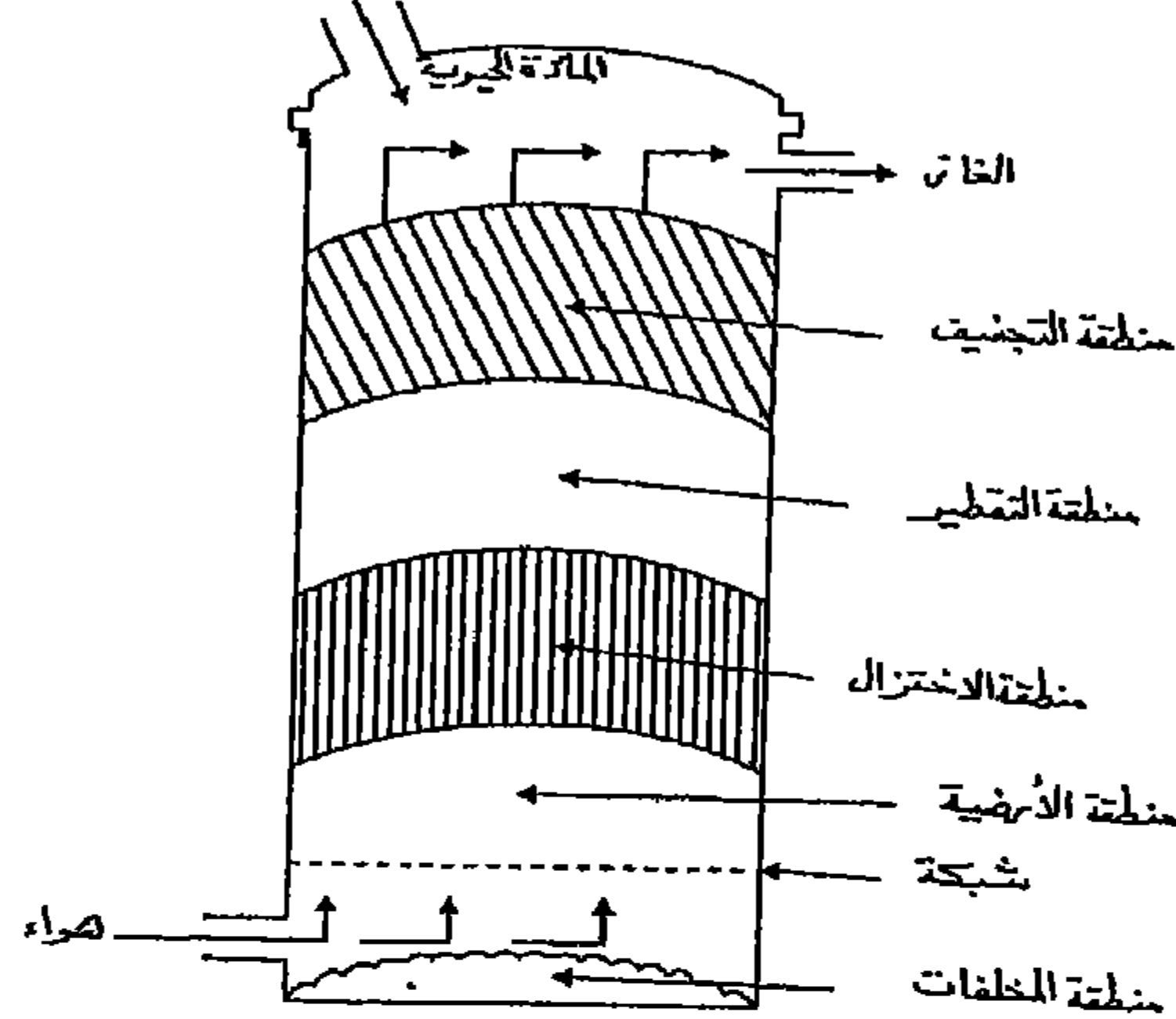
## أنواع المحولات لغاز:

هناك أربعة أنواع من محولات المادة الحيوية لغاز:

- محول للغاز ذو أرضية ثابتة وتيار صاعد.
- محول للغاز ذو أرضية ثابتة وتيار هابط.
- محول للغاز ذو تيار عرضي (جانبي).
- محول للغاز ذو أرضية عائمة (متحركة).

والمحول للغاز ذو الأرضية الثابتة والتيار الصاعد هو أقدم هذه الأنواع (شكل رقم ١١ - ٣) وفيه يدخل الهواء اللازم للعملية إلى الغرفة تحت مستوى الأرضية، فتتكون منطقة احتراق لدى درجة ٢٥٠٠ فهرنهايت (\*) تقريبًا.

وتتحرك غازات الاحتراق متجهة إلى أعلى مارة بالأرضية، وتخرج لدى القمة بعد أن تكون قد بردت إلى درجة ٢٠٠ على مقياس فهرنهايت تقريبًا (٩٣ م).



شكل ( ١١ - ٣ )

المحول الغازي ذو التيار الهابط أو التيار الموازي

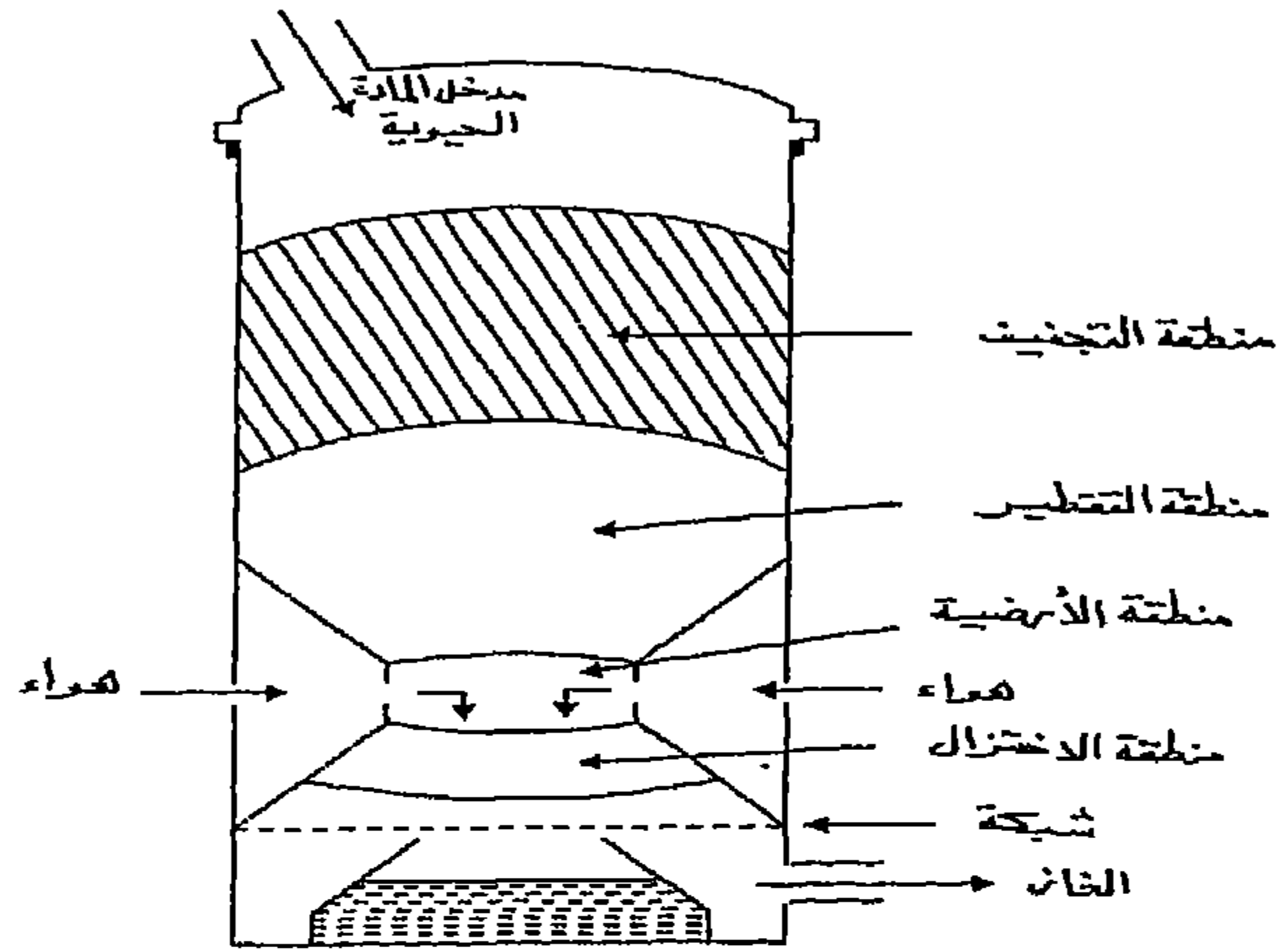
(\*) تعادل حوالي ١٣٧٠ درجة مئوية (المترجم)

ويتمتع هذا التصميم بالمزايا الآتية:

- صلاحيته للعديد من أنواع وقود المادة الحيوية.
- إمكانية استخدامه في تحويل الوقود الرطب، وعدم ضرورة الالتزام بحجم معين.
- تحلل كمية أقل من المياه، وكفاءة أعلى.

ويعيب هذا التصميم انخفاض درجة حرارة خروج الغاز، مما يصعب من نقله، لأن القطران وغيره من السوائل يسهل تكاثفها، ومن ثم فهذا النوع غير صالح لإدارة الآلات.

ويشبه المحول لغاز ذو الأرضية الثابتة والتيار الهابط، المحول ذا التيار الصاعد، فيما عدا أن الهواء يدخله عند منطقة الاحتراق أو أعلاها، ويخرج بالقرب من قاع الغرفة.



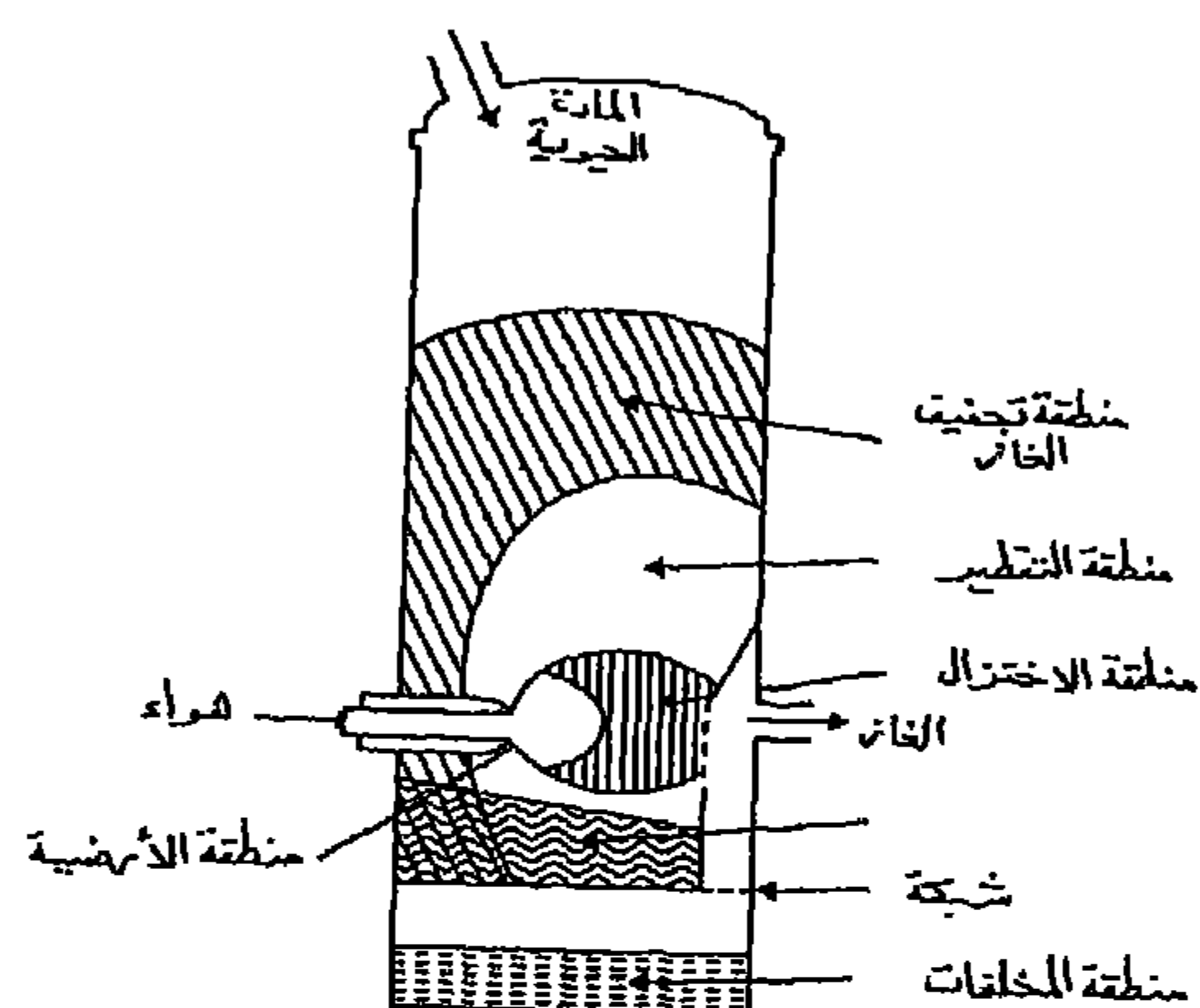
شكل ( ١١ - ٤ )

. المحول الغازي ذو التيار الصاعد أو التيار العكسي

والمحول الغازى من نوع التيار الهابط به سريان متواز، حيث ينساب الوقود إلى أسفل تحت تأثير وزنه.

ويدخل الوقود قرب قمة المحول فى حين يغادره الغاز عند قاعه، وتقع منطقة الاختزال عند قاع طبقة الوقود، وتعلوها منطقة التأكسد، ومن ثم فم منطقة الاختزال على مقربة من منطقة الرماد، وحيث إن الغاز يسرى إلى أسفل فإن المواد سهلة التطاير تمر عبر منطقة التأكسد ذات درجة الحرارة المرتفعة حيث تتكسر المركبات الهيدروكربونية العليا والبوليمرات العليا وتتحلل إلى مركبات أبسط وهيدروكربونات غير قابلة للتكثف، مثل الميثان (ك يد) والـ (ك ٢ يد ٢) وما إلى ذلك، ومن ثم فالغاز المنتج نظيف وخال من القطران.

ويبين شكل (١١ - ٥) محولا للغاز ذا سريان عرضى (جانبى)، وهو محول مدموج صغير الحجم يناسب كثيرا إنتاج الكميات المحدودة من القوى المحركة، كما أن هذا النوع يلائم الأحمال المتغيرة، وإن كان يعيبه اقتصره على استعمال الفحم النباتى وعدم قدرته على تحويل الوقود الرطب إلى غاز.



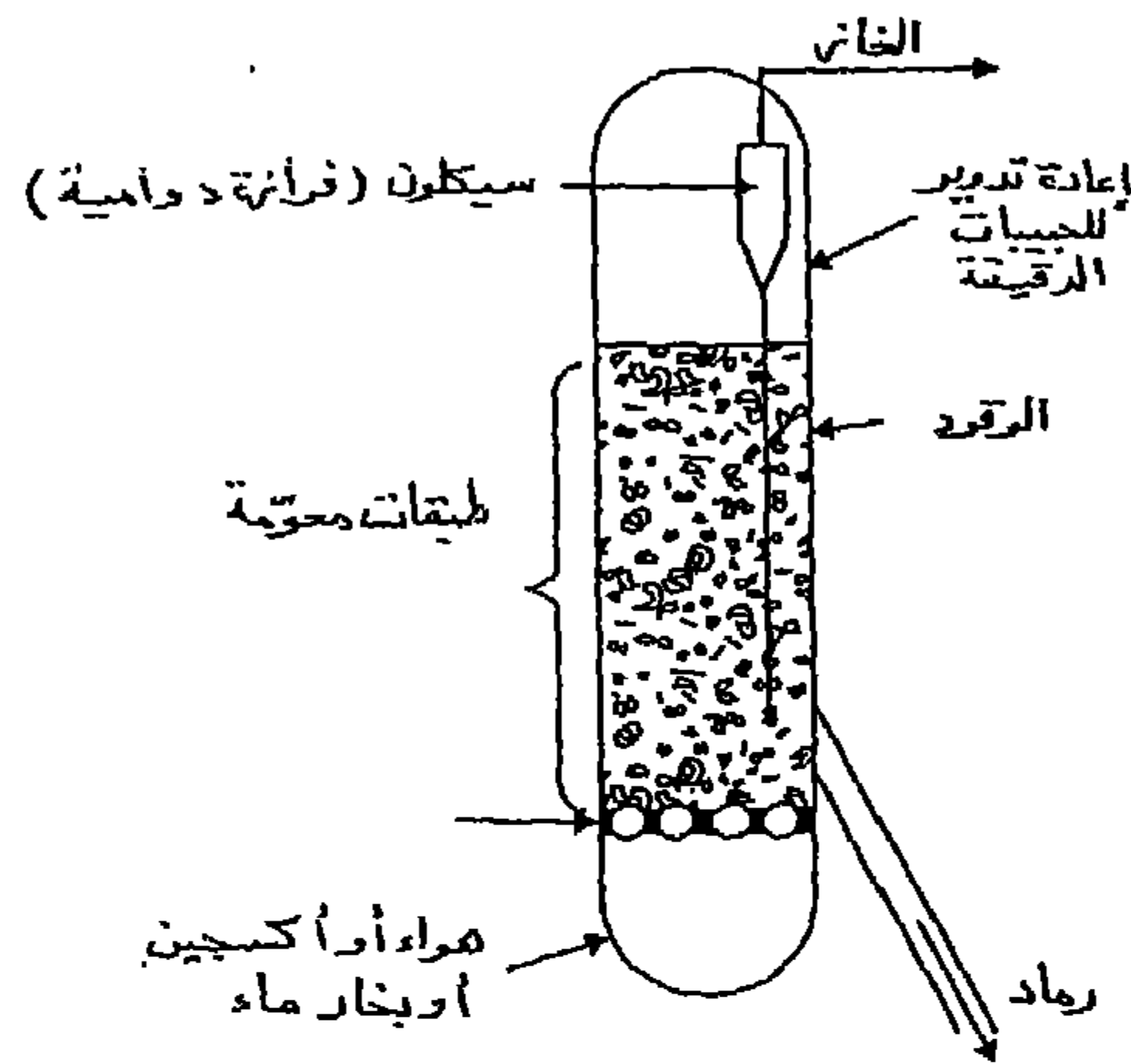
شكل ( ١١ - ٥ )

محول للغاز ذو سريان عرضى (جانبى)



أما المحول للغاز ذو الأرضية العائمة (شكل ١١ - ٦) فقد تطور تصميمه بحيث يبشر بالوصول إلى ساعات أكبر ومعدلات إنتاج أعلى من المحولات ذات الأرضية الثابتة، وبفضل درجة حرارة الغازات الخارجة العالية، فيمكن نقلها عبر مسافات أطول من تلك التي ينتقل لها الغاز المنتج في المحولات الأخرى، وللمحولات ذات الأرضية العائمة ميزة المرونة في المادة الخام المستعملة من حيث حجمها ومحتواها من الرطوبة، وذلك لخلو المحول من أرضية مثبتة، ولهذه المحولات الغازية أعلى معدل للتحويل لغاز لكل متر مربع من مساحة الأرضية، كما أنها نموذجية للاستعمال مع حبيبات الوقود الضئيلة، وتتلخص عيوب هذا النظام في ارتفاع كمية المواد المنبعثة في هيئة حبيبات، إلى جانب الحاجة إلى مصدر حراري مساعد لتسخين الأرضية تسخيناً مبدئياً في البداية.

وتصل كفاءة عملية التحويل في المحولات ذات الأرضية المتحركة لقيم عالية (٨٠% في حالة تحويل الخشب لغاز).



شكل ( ١١ - ٦ )

محول للغاز ذو أرضية عائمة

## التطورات المتقدمة فى تكنولوجيا الغاز الحيوى كمصدر للطاقة:

يعد الغاز الحيوى مصدراً له أهميته بين مصادر الطاقة المتجددة التى يتم الحصول عليها من المواد العضوية، كروث الماشية والمخلفات البشرية، ومختلف أنواع الكيانات الحيوية، وهو وقود عديم الدخان صالح للاستخدام المنزلى.

وتنتج محطة القوى التى تعمل بالغاز الحيوى بالمثل أنواعاً من السماد الغنى على الجودة، ويستتبع تطبيقها العديد من المنافع الاجتماعية، كالتقليل من تقطيع الأشجار لاستخدامها كأخشاب للوقود، والاستغناء عن المهام الشاقة التى تنوء بها النسوة والأطفال، وتحسين الظروف الصحية والبيئية، والتقليل من معدلات أمراض العين والرئة، وتوفير أوقات أطول للعمالة الإنتاجية، لقد بدأ استخدام الغاز الحيوى فى إحداث ثورة فى أساليب الحياة فى كثير من المناطق الريفية بالهند، ولقد حظى برنامج استعمال الغاز الحيوى بشعبية متزايدة فى القرى امتدت به إلى كل أنحاء البلاد تقريباً.

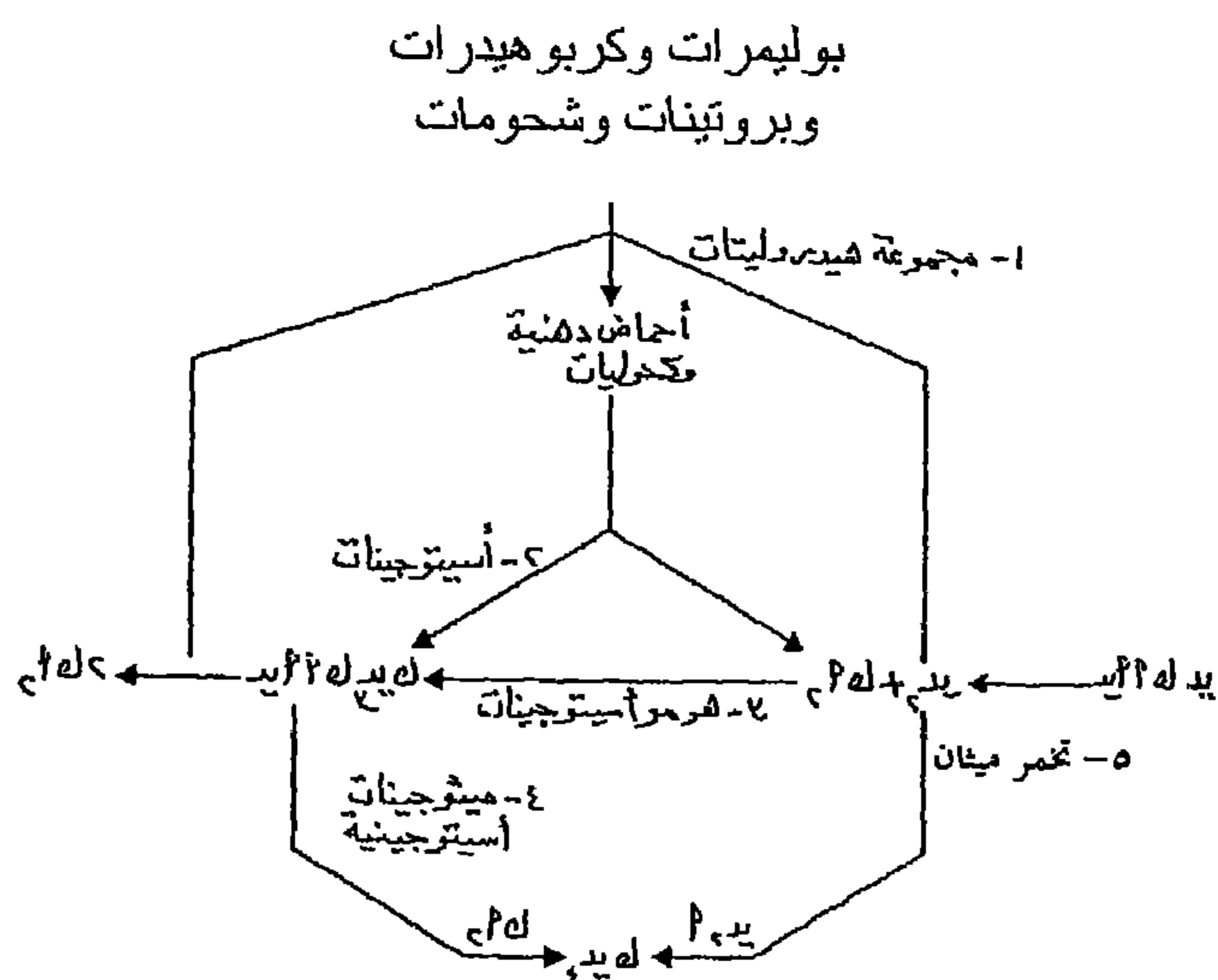
### تخمير الميثان:

تهدف تقنية استخدام الغاز الحيوى إلى مضاعفة تلك الظاهرة الطبيعية التى تنتج غاز الميثان بمعزل عن الهواء من تحلل المواد العضوية ذات القابلية للتحلل، ولقد استخدمت المصطلحات من قبيل "غاز المستنقعات"، و"الوهج المستنقى" (\*)، و"الهواء القابل للاشتعال" فى القرنين السادس عشر والسابع عشر لوصف الغاز الحيوى الذى ينتج بفعل الكيانات الميكروبية، ولقد درس هذا التفاعل بصورة

---

(\*) الوهج المستنقى wisp ضوء ذو وميض يبرق بسرعة فوق المستنقعات السبخية فى الليل على الأرجح نتيجة الاحتراق التلقائى والطبيعى للغازات الناتجة عن تحلل المواد العضوية المتعفنة (المترجم)

تفصيلية خلال العقود الأخيرة، ويطلق عليه عملية تخمر الميثان methanogenous، أو التحلل اللاهوائى للمواد العضوية وتقوم به أربع طوائف من البكتريا هي اسميا: بكتريا التحلل بالمياه hydrolytic وبكتريا حمض الخليك acetogens وبكتريا أكسدة الهيدروجين الحمضية المثلية وبكتريا تخمر الميثان (شكل ١١ - ٧).



شكل ( ١١ - ٧ )

#### سلسلة تفاعلات التخمر الميثانى

وتتحلل البوليمرات - مثل السليلوز - بفعل المياه - إلى أحماض دهنية وإلى كحوليات، تتحلل بدورها إلى أسيتات(\*) وفورمات وهيدروجين وثانى أكسيد الكربون وغيرها، وفي المراحل الختامية تقوم الكائنات الحيوية الأكثر قدرة على البقاء على قيد الحياة والتي تنتج الميثان، بتحويل مركبات تحتوى على ذرة أو

(\*) الأسيتات هي أملاح حمض الخليك (المترجم)

ذرتين من الكربون إلى غاز الميثان، وبالنظر إلى أنه أخف من الهواء يبدأ الميثان في التصاعد من المواد المتخمرة، ومن هنا فإن محطات القوى المعتمدة على الغاز الحيوى تتجه فى تصميمها صوب خلق أفضل الظروف لتتم التفاعلات التى تقوم بها مختلف فصائل هذه الكيانات الحيوية.

### الإمكانات المستقبلية:

تمتلك الهند أكبر عدد من الماشية على مستوى العالم (٢٤٠ مليون رأس) وهو ما يمثل إمكانيات هائلة لتطوير إنتاج الغاز الحيوى، وهناك زهاء ٧٥ مليون عائلة زراعية، تقتنى ٤٣% منها ٤ رؤوس ماشية أو أكثر ( وهو ما يمثل الحد الأدنى من عدد الماشية الضرورى لإقامة محطة صغيرة بالغاز الحيوى ) وقد أكد مجلس التوصيات الخاصة بالطاقة فى تقريره المعنون "تحو منظور جديد للطلب والاستهلاك من الطاقة فى الهند عام ٢٠٠٤ - ٢٠٠٥" على أن وحدات الغاز الحيوى صغيرة الحجم بوسعها أن تلبى الاحتياجات من الوقود لأغراض الطهى لحوالى ١٦ إلى ٢٢ مليون مسكن فى عام ٢٠٠٤ - ٢٠٠٥ م.

### التطور التاريخى لاستغلال الغاز الحيوى بالهند:

بدأ تطبيق مبدأ استغلال روث الماشية فى وحدات الغاز الحيوى بالهند من خلال "المعهد الهندى للبحوث الزراعية" بنيودلهى عام ١٩٣٩، فقد درس الدكتور س. ف. ديساى تأثير العوامل البيئية المختلفة كدرجة الحرارة، وقيمة الأس الهيدروجينى PH<sup>(\*)</sup> وما إلى ذلك، على الإنتاج من الغاز، ووضع تصميمًا مبسطًا لمصنع غاز حيوى، وقد تابع البروفسور ن. ف. جوشي فى بوتا هذه الأعمال، فاعتمد نموذجًا لمصنع غاز حيوى عام ١٩٤٥، كما ابتكر جاشبهاى ج. باتل

---

(\*) قيمة الأس الهيدروجينى Ph value هى مقياس لدرجة الحمضية، ويبدأ من الصفر (أقصى حامضية) وحتى رقم ١٤ والرقم ٧ يناظر حالة التعادل كالماء النقى (المترجم)

نموذجًا مبسطًا يسمى جراملا كسمى Gramlaxmi واعتمده سنة ١٩٥١، وقد تبع ذلك أعمال في رامكريشنا ميشان أشرام في بيلورمات بكلكتا وخادى براتيشان، وسيدور.

ولقد أجرى الدكتور س. ن. أشاريا ومساعدوه تجارب مكثفة فى المعهد الهندى للبحوث الزراعية بنيودلهى، وابتكروا النموذج المسمى بتصميم يارى IARI وأصدر المجلس الهندى للبحوث الزراعية فى ١٩٥٨ نشرة علمية بعنوان "إعداد غاز الوقود والروث عن طريق التخمر اللاهوائى للمواد العضوية".

وقد استأنف ج. ج. باتل مجهوداته فى سبيل تبسيط نموذجيه الذى سبق اعتماده، وأفضى ذلك إلى استحداث نموذج ذى غرفتين ودليل موجه مركزى يتيح لحاوى الغاز الصلب حرية الحركة لأعلى وأسفل، وسمى هذا النموذج "جراملاكسمى ٣" وقد قامت مفوضية الخادى والصناعات القروية ببومباى باتباع هذا النموذج لتعميمه عام ١٩٦٢ وهو شائع الآن ومعروف باسم تصميم "حاوى الغاز الهندى من النوع العائم" (KVIC)<sup>(\*)</sup>، ومن خلال جهود المفوضية ما بين أعوام ١٩٦٢، ١٩٧٣ - ١٩٨٤، أقيمت حوالى ٧٠٠٠ وحدة تعمل بالغاز الحيوى بالبلاد، وقد صمدت تلك الوحدات للزمن بفضل بساطتها وسهولة صيانتها ومتانتها، ولقد اتبع نفس النموذج فى عدد من بلدان آسيا وإفريقيا.

ولقد شغف قسم "التخطيط والبحوث والتنفيذ" التابع لمعهد التخطيط القومى - حكومة أو براديش - لوكتاوأ بأعمال الغاز الحيوى عام ١٩٥٧، فأقام محطة للبحوث أطلق عليها بحوث غاز جوبار<sup>(\*\*)</sup> Gobar فى عام ١٩٦٠ بقرية "أجيتمال" بمقاطعة "إيتاواه" وقد طور "رام بوكس سينج" وهو الذى سلخ أكثر من عشرين

---

(\*) KVIC: هى الحروف الأولى من عبارة مفوضية الخادى والصناعات الريفية، والخادى هو اسم قماش

يغزل يدويًا وهو الذى اتخذته المهاتماغاندى رمزًا لسلاح مواجهة الاستعمار سلميا (المترجم)

(\*\*) جوبار Gobar: كلمة هندية تعنى روث الأبقار (المترجم)

عامًا في الأعمال المتعلقة بالغاز الحيوى بأجيثمال - تصاميم متنوعة لمحطات كبيرة الحجم ذات مرحلتين لتحلل المواد العضوية ومساحات أكثر برودة، ومحطات لتسخين الماء شمسيًا وغير ذلك، كما طور أيضًا من مشاعل الاحتراق، وعدل من تصميم آلة الاحتراق الداخلى بالبتروك كى تعمل بالغاز الحيوى، وخلال الفترة ١٩٧٦ - ٧٨، أجريت محاولات ميدانية على نطاق واسع على محطات القوى العاملة بالغاز الحيوى ذات القبة الثابتة fixed dome فى إيتاواه من حيث أشكالها وأبعادها، وقد تمخض هذا عن تطوير نموذج القبة الثابتة القائم على استخدام روث الماشية، وهو النموذج الشائع المسمى "بنموذج جاناتا" والذي تواصل تحسنه باطراد منذ ١٩٧٩.

وقد اتخذت الخطوة التالية فى التوسع فى التقنية فى أعقاب أزمة الطاقة، حيث دشنت وزارة الزراعة (الهندية) برنامجًا لتطوير "مصادر السماد المحلية"، والذي كان الغاز الحيوى أحد أركانه، وفى الفترة من ١٩٧٤ - ١٩٧٥ إلى ١٩٧٨ - ١٩٧٩، استكملت فوق ٧٠٠٠٠ وحدة غاز حيوى، وقد استأنفت مفوضية الصناعات القروية وحكومة الولاية البرنامج فى عامى ١٩٧٩ - ٨٠، ١٩٨٠ - ١٩٨١ حيث استكملت ٣٠٠٠٠ وحدة أخرى.

وقد أفادت الفترة البينية (١٩٧٩ - ٨٠، ١٩٨٠ - ٨١) قبل أن تستعيد حكومة الهند زمام المبادرة فى تقييم الخبرة السابقة وإطلاق استراتيجيات مستقبلية، فقد تقرر - فى ضوء الإمكانيات المتاحة بالبلاد، والحاجة الملحة لإيجاد بديل من مصادر وقود متجددة بالمناطق الريفية، رفع وتيرة تطوير برنامج الغاز الحيوى إلى الضعف، فوضعت صياغة "مشروع قومى لتطوير استغلال الغاز الحيوى" (NPBD) على أساس نماذج تصميم ووكالات تصنيعية متعددة، من منظور اللامركزية، وللمرة الأولى ينطلق برنامج متكامل يتيح تقنيات مبتكرة داعمة وتدريبًا وحوافز مالية ورقابة رشيدة وغير ذلك، ولقد اكتسبت تلك الخطوة أهمية

إضافية عندما شملها برنامج رئيس الوزراء لعام ١٩٨٢، والذي تضمن عشرين نقطة، ولقد فعلت "إدارة مصادر الطاقة غير التقليدية عام ١٩٨٤ - ١٩٨٥ حزمة من الإجراءات التي طفرت بالتقدم في هذا المجال طفرة ملموسة، بما حقق له انتشاراً وشعبية في عموم البلاد.

### أشهر أنواع محطات الغاز الحيوى فى الهند:

#### المحطات ذات الطابع العائلى:

هناك تصميمان لمحطات قوى الغاز الحيوى تم اختبارهما وأثبتتا جدارتهما الميدانية، هما:

أ) محطة الغاز (جوبار gobar) من طراز KVIC ذات وعاء للغاز من النوع العائم (شكل ١١ - ٨).

ب) الطراز ذو القبة المثبتة (محطة قوى الغاز الحيوى المعروفة باسم جاناتا Janata (شكل ١١ - ٩).

ولقد ابتكرت خمسة طرز مستحدثة ثم اختبارها ميدانياً وثبتت صلاحية التوسع فيها: وبيانها كالتالى:

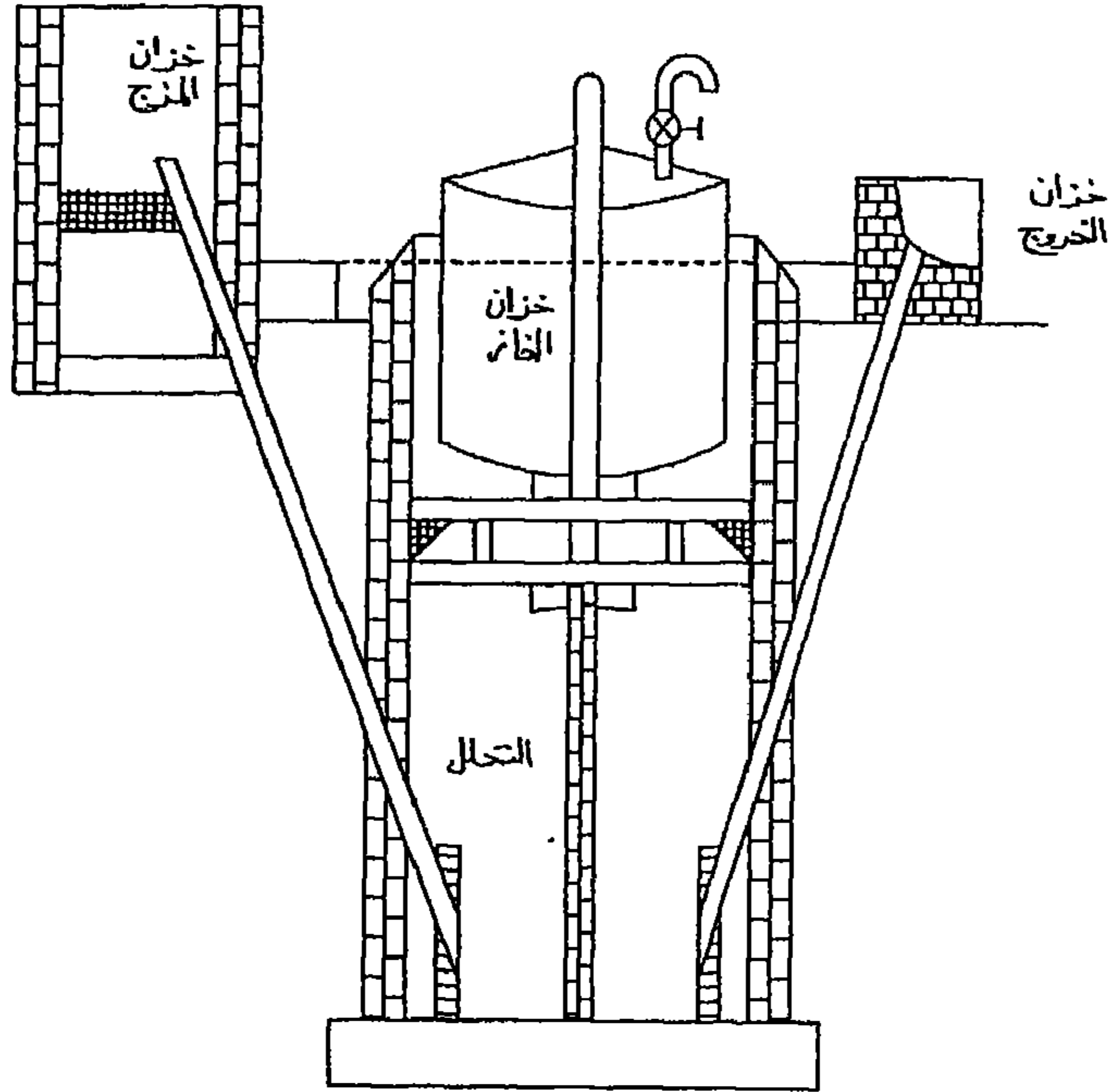
١ - محطة قوى ذات وعاء للغاز من النوع العائم وتحتوى منظومة لتحليل المواد العضوية من زوايا حديدية وصفائح من البوليثلين، ويطلق عليه نموذج (جانيش Ganech).

٢ - محطة قوى ذات وعاء للغاز من النوع العائم وتحتوى منظومة لتحليل المواد العضوية من أجزاء مثقبة من الأسمنت والحديد.

٣ - محطة قوى ذات وعاء للغاز من النوع العائم مصنع من المواد البلاستيكية المقواة بالألياف الزجاجية.

٤ - محطة قوى ذات قاعدة مخروطية الشكل ومنظومة لتحليل المواد العضوية على شكل قشرة، ومزودة بوعاء للغاز، ويطلق على هذا الطراز نموذج براجاتي Pragati (شكل ١١ - ١٠).

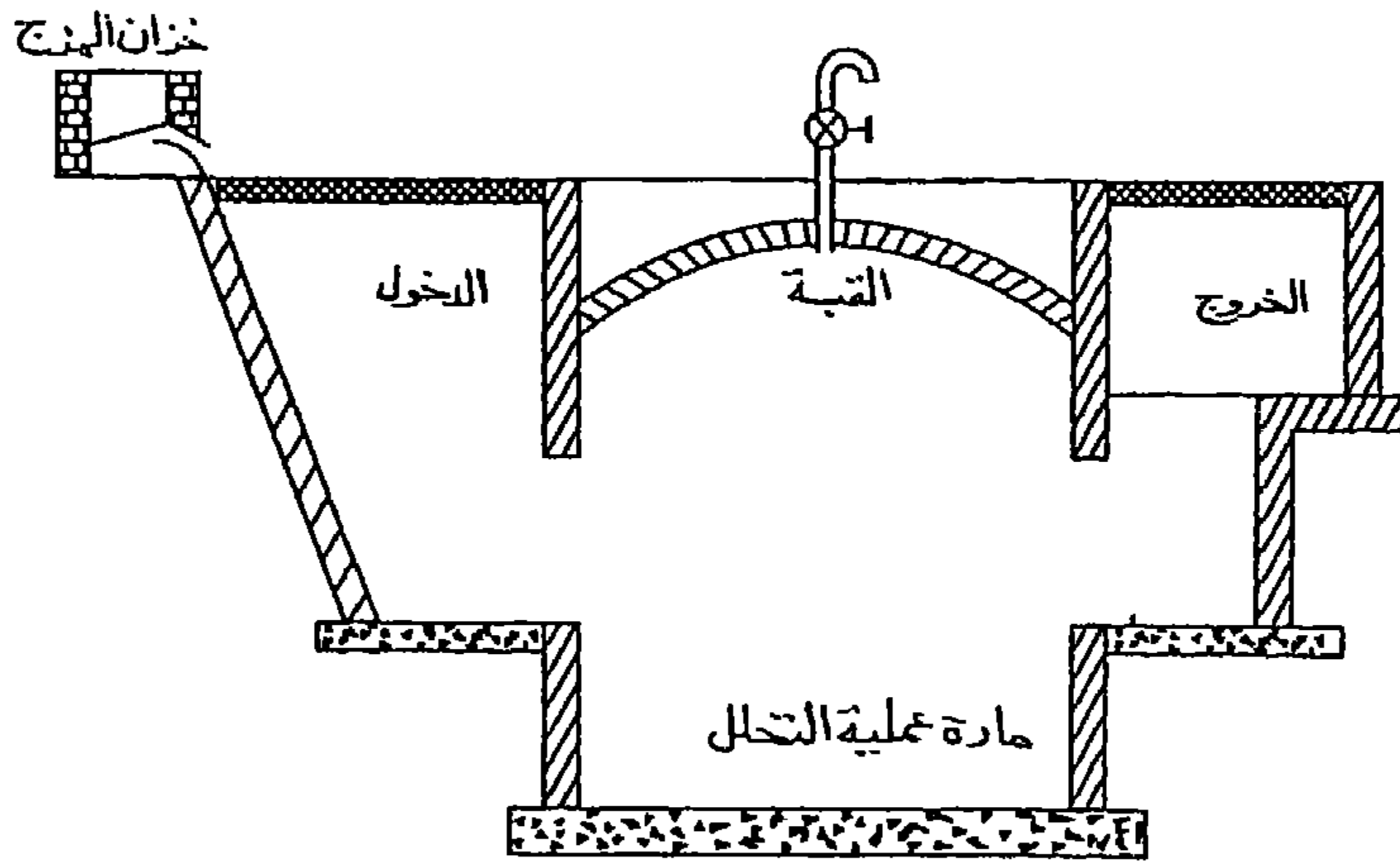
٥ - نموذج نو قبة مثبتة للتركيبات المتنوعة ومزود بمصاريع تسمح بتقسيم القبة إلى أجزاء، ويسمى طراز "دينباندهو Deenbandhu" (شكل ١١ - ١١).



شكل ( ١١ - ٨ )

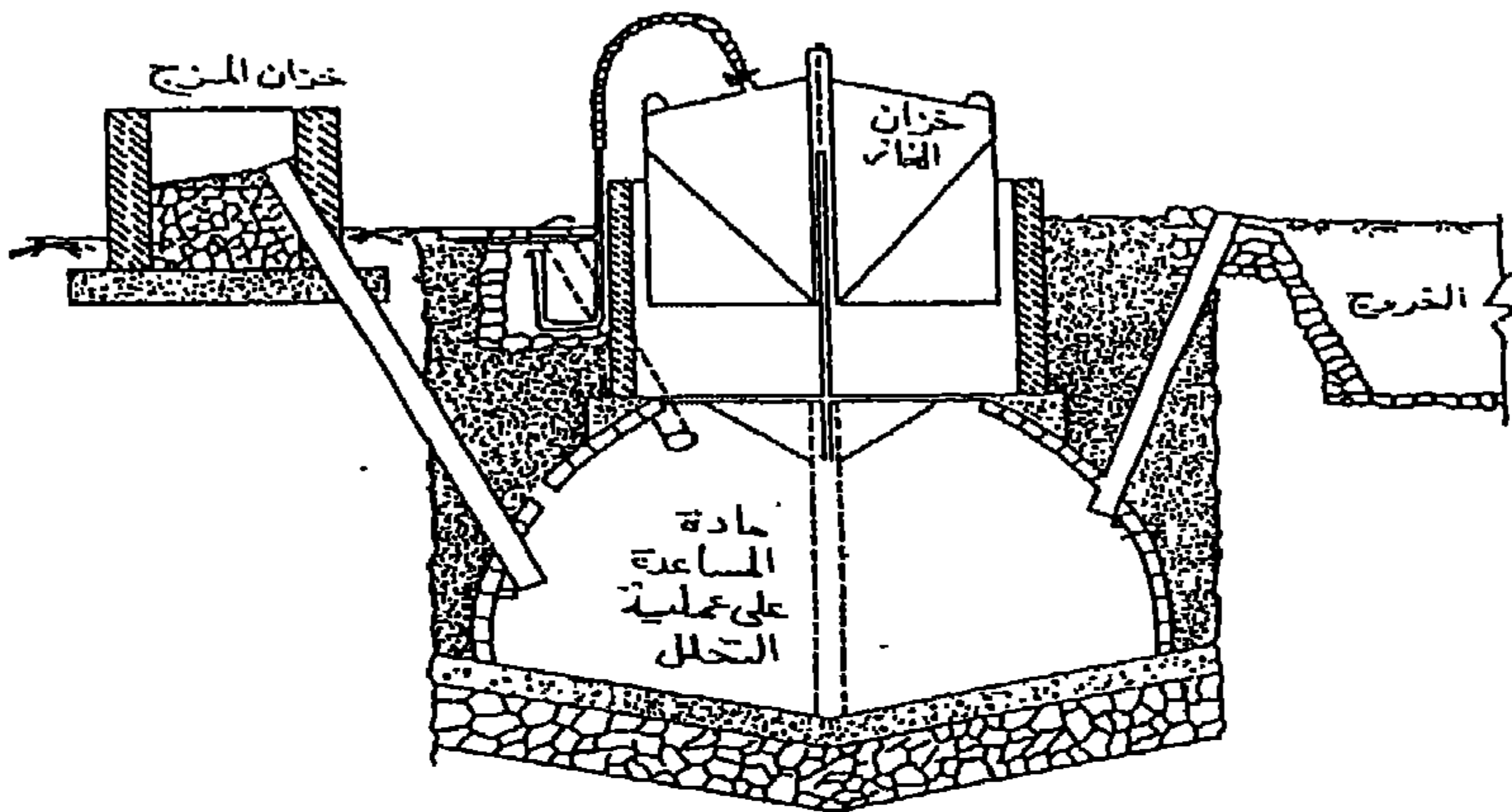
محطة قوى ذات وعاء للغاز من النوع العائم من طراز (KVIC)





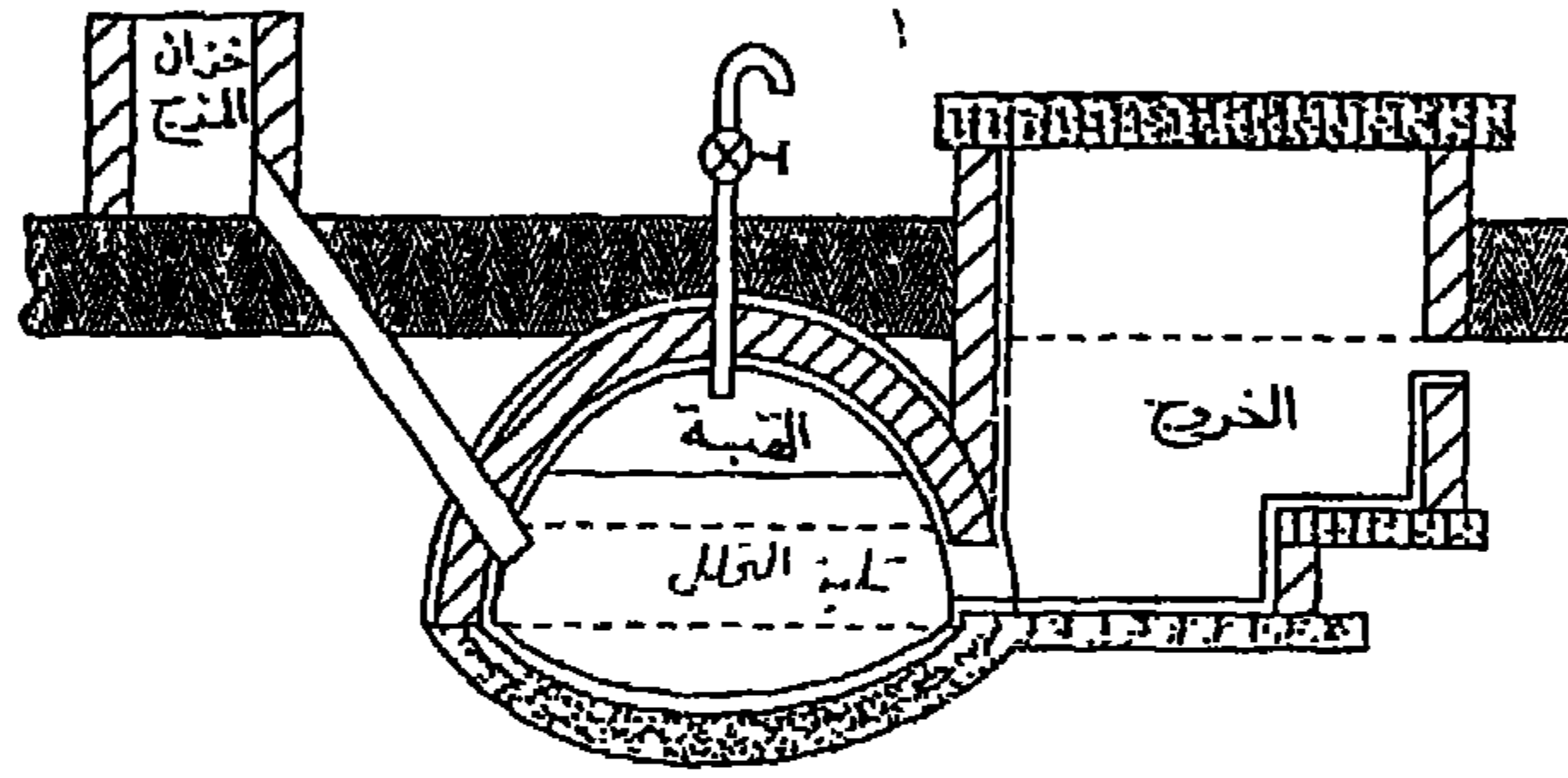
شكل ( ١١ - ٩ )

محطة قوى بالغاز الحيوى ذات قبة مثبتة (طراز جاناتا Janata)



شكل ( ١١ - ١٠ )

محطة قوى بالغاز الحيوى من طراز (براجاتى pragti)



شكل ( ١١ - ١١ )

محطة قوى بالغاز الحيوى ذات قبة مثبتة من طراز (دينباندهو Deenbandhu)

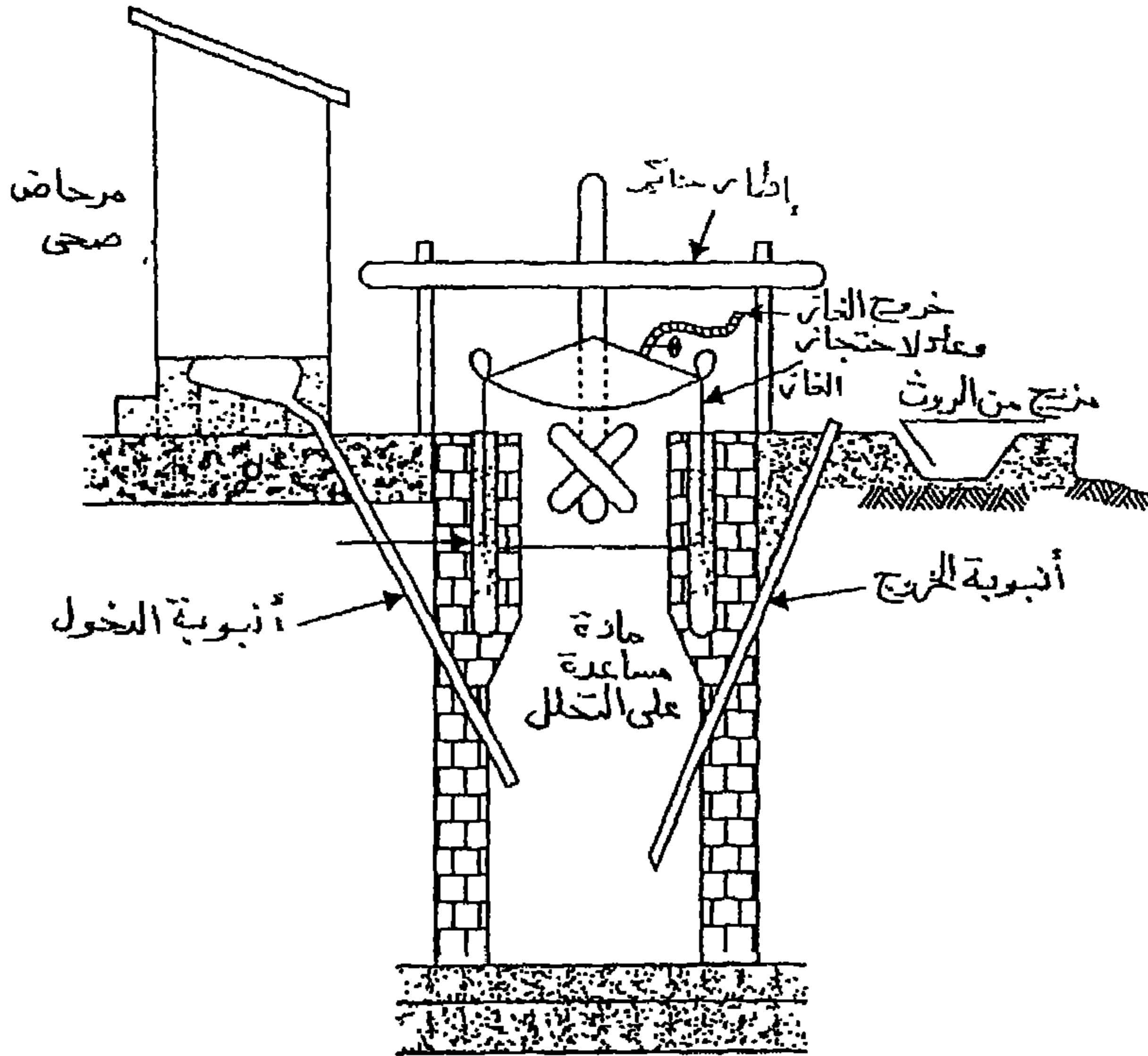
وقد وضعت أنماط قياسية لفترات الاحتباس الهيدروليكي (\*) لمختلف المناطق وفقاً لنطاقات درجات الحرارة وكما هو موضح بالجدول التالى:

رقم المنطقة	متوسط درجة الحرارة شتاءً (°م)	فترة الاحتباس فى مصنع الغاز الحيوى بالأيام
١	أكثر من ٢٠	٣٠
٢	من ١٥ إلى ٢٠	٤٠
٣	من ١٠ إلى ١٥	٥٥
٤	أقل من ١٠	غير ملائمة

ومحطات القوى بالغاز الحيوى التى تحظى بشعبية فى الهند هى - فى المقام الأول من طراز التخمر العضوى شبه المستمر، وأكثر الخامات التى تستخدمها روث الماشية ويمكن بالمثل استخدام الغائط البشرى، ومخلفات الدواجن وفضلات الماشية الأخرى وما إلى ذلك فى هذه النماذج دونما مشاكل، ومن بينها تشييع محطات القوى التى تستعمل الغائط البشرى (شكل ١١ - ١٢). وقد شغل

(\*) hydraulic retention يقصد بها هنا مدة بقاء المادة داخل المحول. (المترجم)

بعض المزارعين محطات قوى من النوع ذى القبة الثابتة بخليط من روث البهائم والفضلات العضوية المجمعة من المطابخ المنزلية.



شكل ( ١١ - ١٢ )

مرحاض صحى متصل بمحطة قوى بالغاز الحيوى

### المشاكل والمعوقات:

تقترب برامج استخدام الغاز الحيوى بالكثير من المشاكل، فهى نشاط شديدة اللامركزية، ينخرط فيه عدد كبير من المنظمات الحكومية وغير الحكومية ذات

الالتزامات المتباينة، ويمكن تصنيف هذه المشكلات تحت أربع فئات، وهى - اسميا - مشكلات فنية، واقتصادية اجتماعية، وتنظيمية، وتمويلية.

ولما كانت المشاكل الفنية تتعلق بالتصميم، وأسلوب نقل التقنية والظروف المناخية والجغرافية، وما إلى ذلك، فهى تختلف من مكان لآخر، وفيما يلي قائمة ببعض هذه المشاكل:

(أ) مشاكل مصدرها التعديلات فى مواصفات التصميم لتلائم الظروف المحلية.

(ب) التغيرات الموسمية فى كمية الغاز المنتج لغياب التحكم فى درجة الحرارة وافتقاد العزل الحرارى السليم للمحطة.

(ج) تراكم المياه فى الأنابيب والحاجة لنزحها بصفة دورية.

(د) ضعف الكفاءة فى تصميم المعدات التى تعمل بالغاز الحيوى.

(هـ) عدم ملائمة التصميم لظروف مناخية أو طبوغرافية معينة.

أما المشاكل الاقتصادية والاجتماعية التى من شأنها أن تعيق تنفيذ البرنامج فهى:

(أ) نقص الوعي بالحاجة إلى محطات قوى الغاز الحيوى كوقود مازال غالبا، رغم توفره بالقرى بتكلفة معدومة تقريبا.

(ب) المغالاة فى بناء محطات ذات أحجام أكبر مما تدعو إليه الحاجة (كمظهر من مظاهر الواجهة الاجتماعية).

(ج) الافتقار إلى الوعي بحكم انتشار الأمية.

(د) الافتقار إلى مصادر التمويل أو القدرة على سحب القروض من المؤسسات التمويلية.

وقد قامت الولايات بالبلاد - فى فترة ما - بالاعتماد على نفسها فى تكوين هيكلها التنظيمى اللازم، ونظرًا لصلوع عدد من المنظمات فى ذلك، ولكون الغاز الحيوى نشاطًا ثانويًا بالنسبة للكثير منها، تبرز من وقت لآخر المشاكل التالية:

(أ) إقامة أبنية معيبة بواسطة بنائين غير مدربين أو مدربين تدريبًا خاطئًا.

(ب) غياب المراقبة الحازمة فى أثناء البرامج التدريبية.

(ج) التأخر فى توريد المواد الخام والمكونات اللازمة لتشيد المحطة.

(د) التأخر فى الحصول على الموافقات الرسمية على القروض البنكية والتأخر فى إنفاقها فى مصارفها.

(هـ) افتقاد التنسيق بين المؤسسات المختلفة.

وتقدم حكومة الهند تسهيلات مالية فى شكل دعم مركزى، ومشروعات من طراز تسليم المفتاح<sup>(\*)</sup>، وحوافز تطويرية، وتحمل نفقات الإصلاح ونفقات الخدمات التنظيمية وتكاليف التدريب، وما إلى ذلك. ومع اطراد الإنجازات المحققة سنة وراء أخرى، تضخمت الأعباء التمويلية، وعلاوة على ذلك فمن شأن التقدم المتسارع أن يعتمد على تطوير استراتيجية مستحدثة تقلص أعباء التمويل من على كاهل الحكومة.

ولا تعد المشاكل التى سلف استعراضها مستحيلة التخطى، فإن خلق دعم تنظيمى قويم، وتطوير نظم مناولة المواد الخام والأجهزة التى تعمل بالغاز الحيوى، وإخضاع تصنيع هذه الأجهزة لنظام ضبط جودة صارم ومحكم، والإشراف الحازم على البرامج التدريبية، وتنظيم الخدمات التى تقدم ما بعد تشيد

---

Turn – key job (\*)

المحطات، والرقابة المنتظمة الدورية وتقييم الخطط، تكفل كلها المساعدة على تجاوز هذه الصعوبات.

ولا شك أن هناك شعورًا بالحاجة إلى وتيرة أسرع في تنفيذ الخطة في كلا المجالين: المحطات ذات النطاق العائلي، ومحطات قوى الغاز الحيوى على نطاق مجتمع أو مؤسسة ما. وعلى أية حال فينبغى أن تصبح هذه الخطط قادرة على الصمود بمفردها إلى أقصى حد ممكن، دونما أدنى دعم حكومى مباشر، ومن المستطاع تحقيق ذلك من خلال جهود منسقة ومتناغمة فيما يتعلق بالابتكارات التكنولوجية، والاستراتيجيات الإدارية والتمويلية المستحدثة لتنفيذ البرامج على نحو لا مركزى، مع التركيز على جودة البناء وخدمات الصيانة للمحطات بعد إنشائها.



**الباب الثانى عشر**

**تحويل طاقة المحيط الحرارية**





## مقدمة:

هناك فرق كبير في درجات الحرارة بين المياه السطحية وتلك التي في الأعماق، في المحيطات الاستوائية وشبه الاستوائية. ووفقا لقوانين الديناميكا الحرارية الأساسية، فبمقدورنا استغلال منحدر درجات الحرارة هذا كمصدر للطاقة. ويقوم مفهوم تحويل طاقة المحيط الحرارية (Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC على استغلال هذا الفارق في درجات الحرارة لإدارة محطات القوى وإنتاج الكهرباء. ويعد تحويل طاقة المحيط الحرارية مصدرا غير مباشر لتكنولوجيا استغلال طاقة الشمس، فالشمس هي التي تدفئ سطح مياه المحيط. وباستطاعة محطة تحويل طاقة المحيطات ذات الكفاءة أن تولد الكهرباء بصورة مستمرة، لأن هذا الفرق في درجات الحرارة يدوم لمدة ٢٤ ساعة يوميا.

تمتص محيطات الأرض الإشعاع الشمسي، وتخزن معظمه في صورة طاقة حرارية بسطح مياه المحيط الدافئة. وتمتص مياه البحار نحو  $\frac{1}{4}$  الطاقة الشمسية التي تصل إلى جو الأرض والبالغة  $1.7 \times 10^{17}$  وات. وفي المناطق الاستوائية يمكن أن تدفئ حرارة الشمس سطح المياه إلى درجة حرارة ٢٥°م، في حين تكون درجة الحرارة في أعماقها ٥°م (على عمق ١٠٠٠ متر). وتعمل دورة القدرة - عند مثل هذا الفرق الطفيف في درجات الحرارة - بكفاءة منخفضة، ومن ثم فإن محطات تحويل طاقة المحيطات باهظة التكاليف وتكون فقط ذات فائدة عملية عند وصول فرق درجات الحرارة إلى ٢٠°م.

ويقدر فرق الجهد الطبيعي في القدرة نتيجة لمنحدر الطاقة هذا بنحو  $10^{13}$  وات. وليس من المجدي فنيا استخلاص كل هذه الطاقة بالكامل، والتقدير العادل له يصل إلى  $10^{11}$  وات، وذلك مقابل طاقة توليد كهرباء مركبة يصل إجمالها على مستوى العالم إلى  $10^{12}$  وات.

## التقنية:

تبلغ كفاءة محطات تحويل طاقة المحيطات الحرارية ٢,٥ % تقريبا، ولانخفاض كفاءتها فإنها فى حاجة إلى معدلات سريان هائلة من مياه السطح الدافئة ومياه الأعماق الباردة. ولكى تولد مثل هذه المحطة زهاء ١٠٠ ميجاوات من الكهرباء لابد من ضخ نحو ٤٥٠ م<sup>٣</sup> من كل من الماء الدافئ والبارد خلال مبادلاتها الحرارية فى كل ثانية. ويمكن تشييد محطات استغلال حرارة المحيطات على اليابسة، أو على رصيف عائم أو على سفينة بالبحر (شكل ١٢ - ١). وتمثل الماسورة الضخمة اللازمة لجلب المياه الباردة إلى السطح مكونا جوهرى فى محطة استغلال حرارة المحيطات. ويتوقع أن يصل قطر هذه الماسورة إلى ٢٠ مترا، وطولها لما بين ٦٠٠، ١٠٠٠ متر لبناء محطة لاستغلال حرارة المحيط بقوة ١٠٠ ميجاوات. ويمثل إحكام تثبيت المحطة على عمق ١٠٠٠ متر تحت الماء مشاكل إضافية ولكنه جد ضرورى إذا أريد نقل الكهرباء المولده إلى اليابسة.

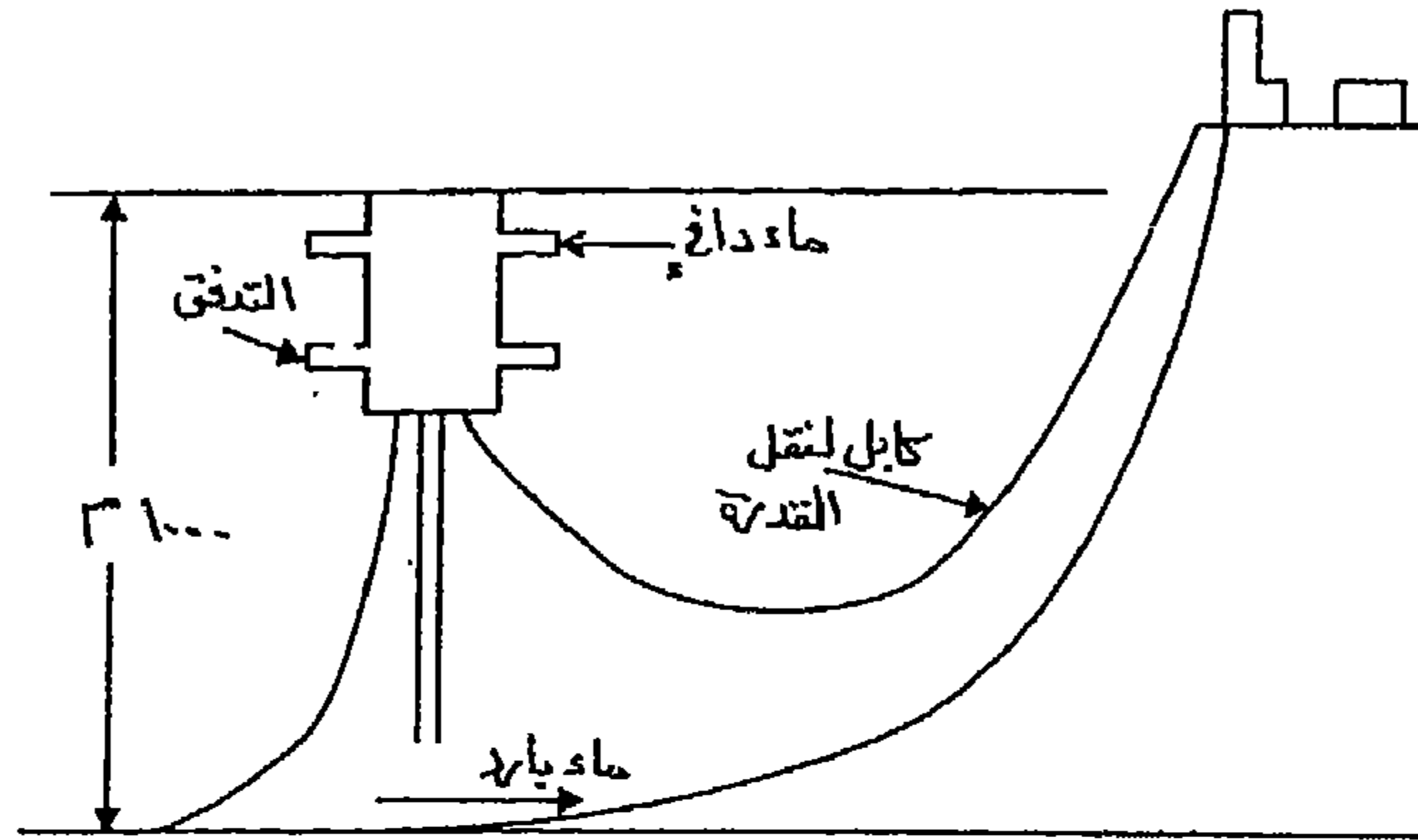
ولتحويل المنحدر الحرارى إلى طاقة كهربائية، يمكن استعمال مياه البحر الدافئة فى تسخين سائل ما ذى درجة تبخر منخفضة (يسمى بالمائع العامل) مثل الأمونيا أو الفريون أو البروبان.

وتصمم محطات استغلال حرارة المحيط للعمل على أساس الدورة المغلقة أو الدورة المفتوحة (انظر شكل ١٢-٢، ٣).

ففى الدورة المغلقة يضخ ماء سطح البحر الدافئ عبر مبخر، يجرى فيه تبخير المائع العامل كالأمونيا، والمائع العامل فى الدورة المغلقة هو وسيط مبرد قادر على التبخر عند تعرضه للماء الدافئ، وقادر على التكثف عند تعرضه للماء البارد. ويولد المائع العامل لدى تبخره ضغطا فيتمدد، ناقلًا جزءا من طاقته لتوربين، ثم يتكثف بفعل الماء البارد القادم من الأعماق وتتكرر الدورة.

ويمكن أن يستخدم ماء البحر كمائع عامل في حالة محطات استغلال حرارة المحيطات ذات الدورة المفتوحة. وفي هذه الحالة لا يعاد تدوير المائع العامل، بل يتبخر ماء البحر الدافئ عند ضغط منخفض للغاية ( $0.03$  من الضغط الجوى) في مبخر ومضى خاص *flash evaporator* (\*)، ويمر البخار الناتج خلال توربين، فيتكثف إما بفعل التلامس المباشر مع ماء البحر البارد وإما بفعل مكثف مسطح. وفي حالة استخدام المكثف المسطح نحصل على ماء نقي عذب.

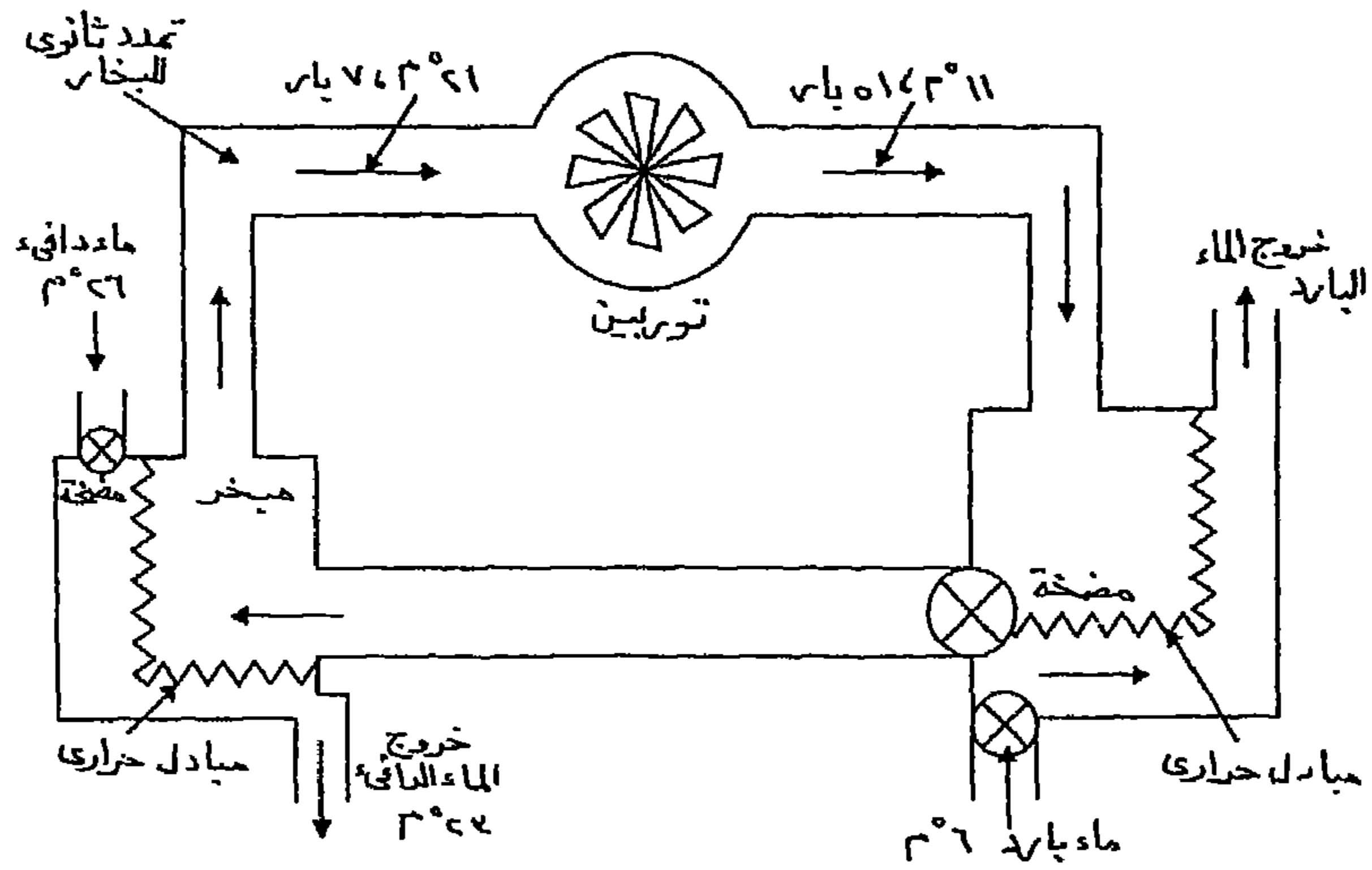
وفي كلا الدورتين المفتوحة والمغلقة يتسبب تكاثف البخار في تولد فرق في الضغط عبر التوربين، يخلق تيارا من البخار يكفي لتشغيل المولد منتجا الكهرباء. وتحظى الدورة المغلقة بمميزات عن الدورة المفتوحة، حيث تحتاج الأولى إلى توربين أصغر ولا تحتاج إلى مضخات ضغط منخفض أو مضخات إزالة غازات، تلك المضخات المستهلكة للقدرة. وفي حالة الدورة المفتوحة يمثل الماء العذب الذي نحصل عليه كمنتج ثانوى، منتجا بالغ الأهمية في بعض المناطق.



شكل (١٢ - ١)

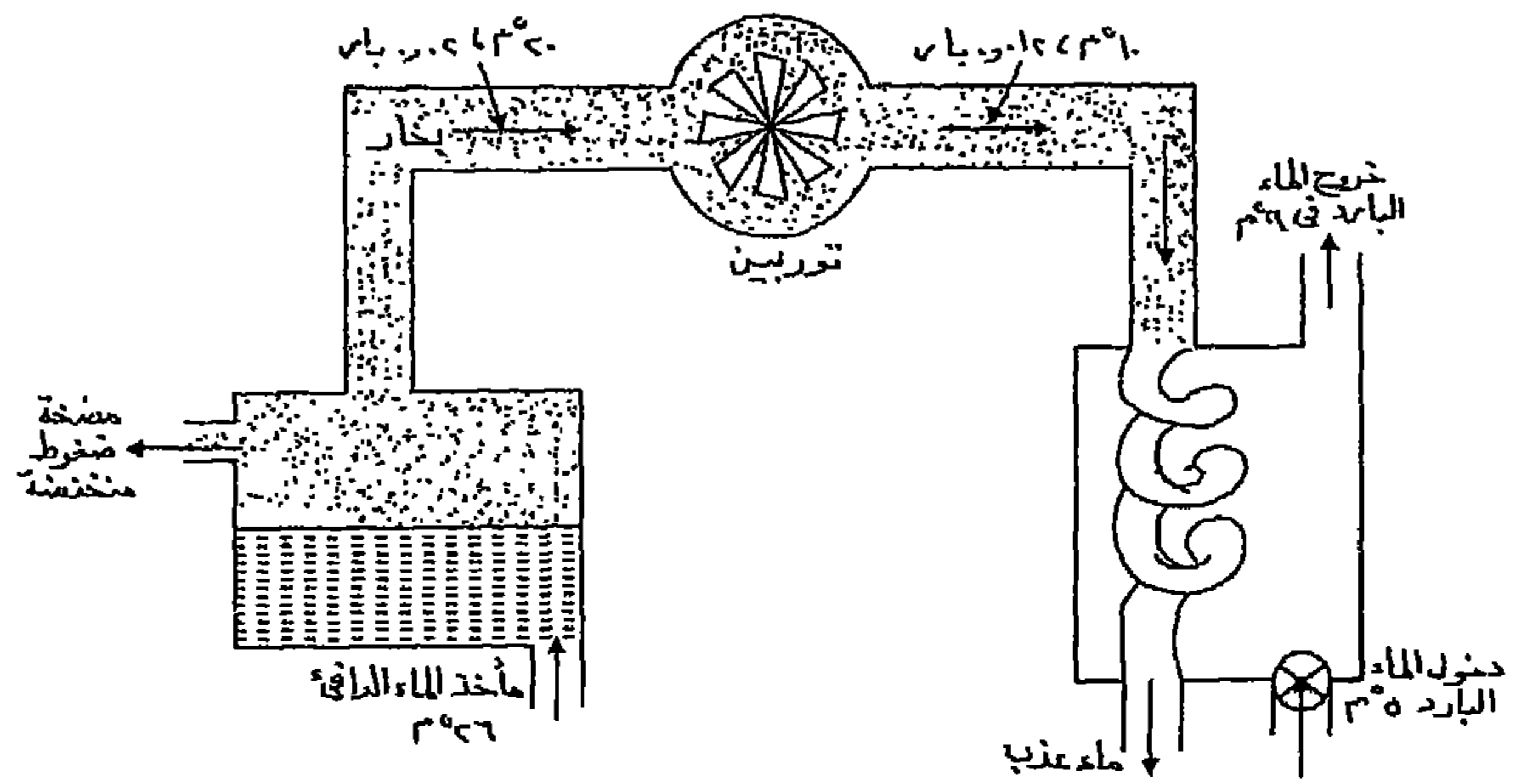
رسم تخطيطى لرصيف عائِم لمحطة تحويل طاقة المحيطات الحرارية

(\*) مبخر يتم فيه التبخير عن طريق خفض الضغط (المترجم)



شكل (١٢ - ٢)

محطة استغلال طاقة المحيطات الحرارية في وضعية الدورة المغلقة



شكل (١٢ - ٣)

محطة استغلال طاقة المحيطات الحرارية في وضعية الدورة المفتوحة

## البحوث والتطوير:

نفذت بعض البلدان النشطة في مجال بحوث وتطوير محطات استغلال حرارة المحيطات عددا من المشاريع، أو هي في سبيلها إلى ذلك:

- اتخذت فرنسا قرارا بتشييد محطة بقوة ٥ ميجاوات على الساحل بتاهيتي.

- تدعم الحكومة اليابانية مشروع تصميم محطة عائمة بقوة ١٠ ميجاوات وهناك محطة على اليابسة مأخوذة في الاعتبار. وتخطط هيئة Tokyo Electric لبناء محطة قدرتها ٢٠ ميجاوات على جزيرة ناورو كخطوة تالية بعد نجاح محطاتها بقوة ١٠٠ كيلووات التي أنشئت هناك.

- في المملكة المتحدة صمم العلماء محطة بنظام الدورة المغلقة قدرتها ١٠ ميجاوات ويخطط إنشاؤها في البحر الكاريبي أو المحيط الهادي، إلى جانب محطة بنظام الدورة المغلقة على الشاطئ يعتزم بناؤها في هاواي، مع الاستفادة من الماء العذب في الزراعة.

- في هولندا، تم إعداد دراسات الجدوى لإنشاء محطة عائمة (١٠ ميجاوات) في جزر الأنتيل الهولندية، ومحطة شاطئية (١٠٠ كيلووات) في (بالي).

- في الهند تم تحديد موضع ملائم قرب ساحل جزيرة "لاكشادويب" في "كافاراتي" وإن تم نقل الاختيار مؤخرا إلى مينيكوي. وقد أنجزت هيئة المستشارين الميثلورجيين والهندسيين المحدودة (رانشي) (بالهند) دراسات الجدوى لإقامة محطة من هذا النوع بقوة ١ ميجاوات.

وعلى كل حال، لم تثبت جدوى اقتصادية لإقامة محطات من ذلك النوع بهذه الطاقات الضئيلة. ومن الأجدى اكتساب الخبرة للتعرف على مشاكل تشييد المحطات ذات السعات الصغيرة الجوهرية وحلها عن طريق البحث والتطوير.

### التأثيرات البيئية:

قد يصحب تشغيل مثل هذه المحطات عدد من التأثيرات البيئية المحتملة وهي:

(١) قد تتسبب معدلات السريان الهائلة من تيارات الماء الدافئ والبارد فى تغير الأنماط المناخية سواء محليا أو عالميا.

(٢) قد يتحرر ثانى أكسيد الكربون الذى تحتوى عليه مياه أعماق المحيط وينطلق إلى الجو، عند ضخ هذا الماء ثم تسخينه فى المكثف. ويمثل انطلاق ثانى أكسيد الكربون خطرا حقيقيا للمحطات ذات النظام المفتوح حيث إن الماء الدافئ لابد وأن يخلى من الهواء قبل أن يجرى تبخيره فى المبخر الرذاذى.

(٣) تؤثر هذه المحطات أيضا على الحياة البحرية. فقد تتأذى الأسماك والبيضات واليرقات التى تسحب إلى المحطة، كما أن التغيرات فى درجات الحرارة والملوحة قد تبدل النظام البيئى المحلى.

**ملحوظات على (تحويل طاقة المحيط الحرارية):**

يبدو أن محطات تحويل طاقة المحيطات الحرارية لن تلعب إلا دورا ثانويا كمصدر لتوليد الكهرباء فى المستقبل المنظور، فالتقنية يعيقها الموقف الاقتصادى

ويمكن إرجاع تكلفتها العالية إلى انخفاض كفاءة دورتها الحرارية لتوليد القدرة والتي تحتاج إلى معدات ذات حيز كبير يمكنها التعامل مع معدلات سريان الماء الهائلة. وربما يمكن تقليص التكاليف بإدخال تحسينات على تصميم المبادل الحراري وأنبوب الماء البارد. وعليه فإن الآمال المستقبلية في هذه المحطات منحصرة إلى حد كبير في مواقع محدودة.





## **الباب الثالث عشر**

### **طاقة الأمواج وموجات المد والجزر**



## مقدمة:

يستقبل المحيط الطاقة ويخزنها ثم يسربها خلال عمليات فيزيائية متنوعة. وتوجد الطاقة في شكل الأمواج وموجات المد والجزر، وهو ما جرى ويجرى التخطيط لاستغلاله.

ويتيسر استغلال طاقة المد والجزر فقط بتطبيق التقنيات المتاحة على نطاق تجارى. وحتى فى هذه الحالة فإنها تستغل فى مواقع استرشادية نصف صناعية تعد على الأصابع.

وربما يتأثر استغلالنا لطاقة الأمواج بإيقاع التطور التكنولوجى واتساع مداه. ومن الصعوبة بمكان أن نتنبأ بمدى احتمالية ثبوت جدواه وقدرته على المنافسة. وتختلف طاقة الأمواج وموجات المد والجزر بوضوح وبدرجة كبيرة عن بعضها البعض من حيث عملياتها الفيزيائية، وتقنيات الاستغلال ودرجة التطور. وسندرس كلا منها - فى هذا الباب - على حده.

## طاقة موجات المد والجزر:

### أصل موجات المد والجزر:

تنشأ موجات المد والجزر بتأثير الشد الجذبوى للقمر والشمس والمسقط على محيطات الأرض، وهى تدور حول نفسها. وتسبب الحركة النسبية لهذه الأجرام ارتفاعا وانخفاضا متكررين طبقا لعدد دورات التأثير المتبادل. وتشمل هذه الدورة النصف يومية التى تنشأ من دوران الأرض داخل مجال جاذبية القمر، والذي يؤدي

إلى مدة دورة تبلغ ١٢ ساعة، ٢٥ دقيقة بين أقصى ارتفاعين لسطح الماء فى المحيطات، ثم هناك دورة كل ١٤ يوما تتكرر كلما اتحد مجالا جذب الشمس والقمر ليحدثا أعلى وأدنى مد وجزر (ويسميان الموجتين العظمى والدنيا على التوالي)، وهناك دورة نصف سنوية تتأثر بميل مستوى مدار القمر وتؤدي إلى فترة تستمر حوالى ١٧٨ يوما بين أعلى موجتى مد وجزر فى الاعتدالين (فى مارس وسبتمبر). وتحدث الدورات الأخرى، مثل تلك التى تستمر ١٩، ١٦٠٠ سنة من التأثير المتبادل بين المجالات الجذبية.

### تصميم قناطر موجات المد والجزر:

يتكون المخطط الحديث للاستفادة من طاقة المد والجزر من قناطر أو سد يبنى معترضا لمصب نهر بحيث يكون مجهزا بسلسلة من البوابات ذات الصمامات التى تسمح بدخول الماء إلى الحوض. وتستخلص القدرة فى هذا المخطط بواسطة توربينات محورية تعمل على ساقط (\*) head منخفض بدلا من ساقية مياه.

وتولد الكهرباء فى محطات موجات المد والجزر بتوربينات ضخمة من النوع المحورى يصل قطرها إلى ٩ أمتار. وبسبب اختلاف وتذبذب ساقط المياه، وزوايا الموزع فإن التوربين وريشاته (أو كليهما) تعدل أوضاعهما بما يكفل أقصى كفاءة ممكنة. كذلك إذا كان التوربين سيستعمل فى كلا الاتجاهين (لتوليد الكهرباء وللضخ المياه بمرورها فى الاتجاه العكسى) فإن تعديلات يجب إدخالها لتكفل ذلك وتنظمه.

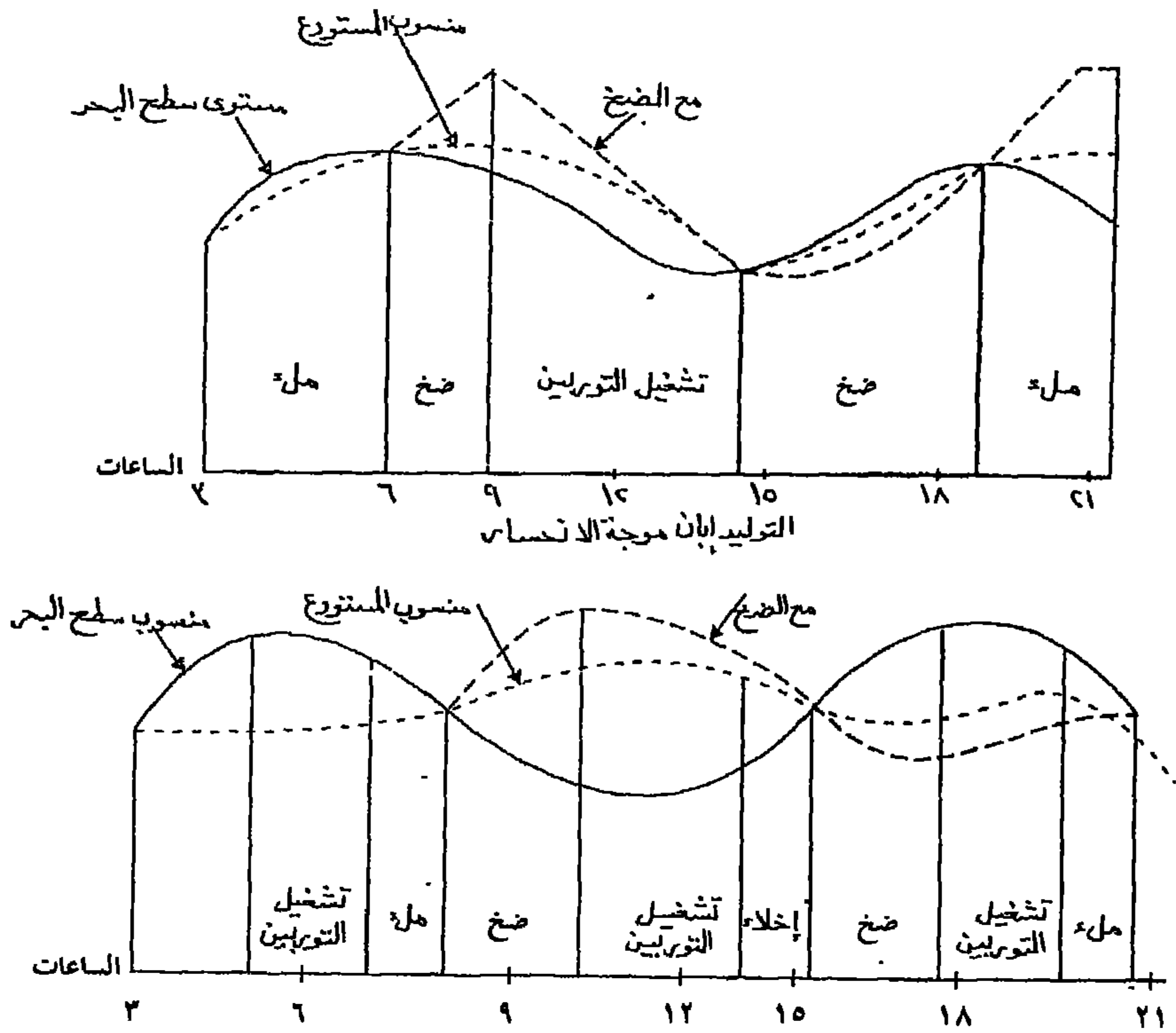
### وضعية التشغيل:

يمكن تشغيل قناطر موجات المد والجزر بإحدى وضعيات ثلاث: توليد الكهرباء فى فترة الانحسار، التوليد فى أثناء فترة الفيضان، أو التوليد فى الاتجاهين.

---

(\*) الساقط هو الفرق بين منسوبى الدخول والخروج فى سطح المائع (المترجم)

وفى توليد الانحسار يسمح لموجة المد أن تنساب إلى الداخل خلال البوابات والتوربينات، ثم تحجز فى الداخل حتى تنحسر الموجة بدرجة تكفى لخلق فارق منسوب ملائم. وعند ذلك يطلق الماء خلال التوربينات مولدا الكهرباء. وتعلق عملية إطلاق المياه حتى تتقلب الموجة وتبدأ فى الارتفاع، متسببة فى انخفاض فارق المناسيب إلى مادون نقطة الحد الأدنى للتشغيل. وحيث يرتفع الماء فإنه يدخل مرة ثانية إلى الحوض، مكرراً الدورة كما فى شكل (١٣ - ١).



شكل (١٣ - ١)

توليد القوى فى اتجاهين

ويعكس توليد الفيضان، دورة توليد الانحسار، إذ تولد الكهرباء عندما تفيض مياه المد إلى داخل الحوض. وليس لهذه التقنية كفاءة عالية لأن الطبيعة المنحدرة لحواف الحوض ينتج عنها - عموماً - مردود أقل من الكهرباء.

في التوليد في اتجاهين، تستخلص الطاقة من كلا موجتي الانحسار والفيضان. وهي لا تغل - عادة - طاقة أكبر من تلك الناتجة من توليد الانحسار، لأن محاولة توليد القدرة خلال نوبة الفيضان ستحد من إعادة ملء الحوض، وبالتالي تحد من مقدار الطاقة التي يمكن توليدها خلال نوبة الانحسار. ويمكن تشغيل التوليد في الاتجاهين عبر فترات زمنية أطول من اليوم، ومن ثم يكون ذا ميزة في الأماكن التي يحتاج فيها إلى تغذية محددة بالكهرباء.

وقد شغلت قناطر "لارانس" بفرنسا أصلاً بهذه الطريقة.

ويحبذ ضخ الماء لقدرته على زيادة الطاقة المستفاد، فبعكس أداء التوربين بحيث يعمل كمضخة يمكن توليد ساقط (فرق منسوب). وتومئ دراسات الجدوى في المملكة المتحدة إلى عدد من خطط توليد الطاقة من موجات المد والجزر. إلا أن العائد في الطاقة بالضح - إذا ما قورن بالتوليد بالانحسار قليل وإن كان ذا فائدة، إذ يتراوح ما بين ٥، ١٥%.

### البحوث والتطوير:

لم تبدأ المحاولات الجادة لتطوير القناطر من أجل توليد الكهرباء إلا بعد ١٩٦٠. أما الآن فهناك تقدم ملموس في أساليب تشييدها وتصميم الآلات وتقنيات تشغيلها. وقد استهدفت جهود التطوير بنسبة كبيرة تقليل النفقات الرأسمالية أو فترة التشييد أو كليهما، وزيادة الكهرباء المولدة وتقليل احتمالات الأضرار البيئية. وقد أقيمت حتى الآن محطات قوى قليلة لاستغلال موجات المد والجزر، كانت

أولاًها وأكبرها قناطر بقدرة ٢٤٠ ميجاوات لتوليد الكهرباء تجارياً في ١٩٦٠ في "لارانس". ولقد انقضى على تشغيلها بنجاح الآن أربعون عاماً<sup>(\*)</sup>. والمحطات الأخرى تشمل محطة بقدرة ١٨ ميجاوات في أنابوليس، ومحطة بقدرة ٠,٤ ميجاوات في كيسلاي جوها" بروسيا، ومحطة بقدرة ٣,٢ ميجاوات في جيا نجهيا بالصين (جدول ١٣ - ١).

### جدول (١٣-١)

#### محطات قوى موجات المد والجزر القائمة

الموقع	المد المتوسط لموجة المد والجزر بالمتر	مساحة الحوض كم <sup>٢</sup>	القدرة المركبة ميجاوات	الطاقة التقريبية المولدة سنوياً جيجاوات ساعة	تاريخ الدخول في الخدمة
لارانس (فرنسا)	٨,٠٠	١٧	٢٤٠,٠٠	٥٤٠	١٩٦٦
كيسلاي جوها (روسيا)	٢,٤	٢	٠,٤	—	١٩٦٨
جيا نجهيا (الصين)	٧,١	٢	٣,٢	١١	١٩٨٠
أنا بوليس (كندا)	٦,٤	٦	١٧,٥	٣٠	١٩٨٤
مواقع مختلفة بالصين	—	—	١,٨	—	—

(\*) اعتباراً من عام صدور هذا الكتاب ( المترجم )



وأكثر المواقع فى الهند جاذبية لتطوير الإفادة من قوى المد والجزر هو خليج (كامباى) وخليج (كاتش) على ساحلها الغربى، فهناك حد أقصى لنطاق المد والجزر يبلغ (١١، ٨ م)، ونطاق متوسط يبلغ ما بين ٦,٧٧، ٥,٢٣ م لهذين الموقعين على الترتيب. وبدلتا نهر الجانج فى سوندربانز بغرب البنجال مواقع طيبة لاستغلال قوى المد والجزر على نطاق صغير. فالحد الأقصى لنطاق المد والجزر فى سوندربانز يبلغ ٥ م ومتوسطه ٢,٩٧ م. ويبلغ المخزون ذو الجدوى الاقتصادية من قدرات المد والجزر بالهند نحو ٨٠٠٠ - ٩٠٠٠ ميجاوات منها حوالى ٧٠٠٠ ميجاوات بخليج كامباى وحوالى ١٢٠٠ بخليج كاتش.

### المضاعفات البيئية:

الطاقة من المد والجزر غير ملوثة، ويمكن أن تحل محل أنواع الوقود من فحم وهيدروكربونات. وبحلولها محل الفحم يمكن لقناطر المد والجزر أن تحول دون انبعاث مليون طن من ثانى أكسيد الكربون لكل تترات ساعة من القدرة المولدة. ومن جهة أخرى تحمى القناطر الشواطئ الساحلية من عواذى موجات المد والجزر العاتية. وربما تغير مشروعات الطاقة من المد والجزر، من النظم المناخية المحيطة بمصببات الأنهار، ومن ثم يتوجب تقييم الآثار البيئية المترتبة وتحليلها بالعناية اللازمة، وتحديد مدى إمكانية تقبلها قبل الشروع فى تنفيذ أى مشروع. ويجب أن تشخص عناصر النظم البيئية المحيطة بالمصببات للتأكد من نوعية المياه ونوعية المواد المترسبة وتعداد الطيور والأسماك. وحتى اليوم، لم تخضع محطات القوى المعتمدة على موجات المد والجزر لرصد شامل لآثارها البيئية. ومع هذا فمعظم خبرات تشغيلها عمليا ذات مردود إيجابى رغم بقاء بعض الآثار التى لم يتم التأكد منها، والتى تحتاج للمزيد من التحريات، وبوجه خاص على مستوى الموقع

المنتقى بعينه. ولم تظهر حتى الآن عوامل أساسية تمنع التوسع في إنشاء محطات القوى المدية، مع إيلاء العناية الواجبة لمخططات تصميمها.

### طاقة الأمواج:

تنشأ الأمواج نتيجة التأثير المتبادل بين الرياح وسطح البحر، ولها طاقة حركية تعبر عنها سرعة المياه، كما أن لها طاقة وضع هي دالة في مقدار المياه المنزاحة عن المنسوب المتوسط لسطح البحر. وتتوقف كمية الطاقة التي تنقلها الرياح إلى المحيط على سرعتها، والمسافة التي تتبادل عبرها التأثير على المياه والفترة الزمنية لهذا التأثير. وتعتمد سرعات الأمواج على طولها، فمن شأن الأمواج الطولية أن تتحرك بسرعة أكبر.

وقدرة موجة ما تقاس بدلالة المعدل الذي تنتقل به طاقتها عبر خط طوليه متر واحد في اتجاه عمودي على اتجاه حركتها، ويعبر عنها بوحدات كيلو وات لكل متر من صدر الموجة *wave front*. والقدرة في الموجة ثابتة تقريبا وحتى أعماق كبيرة، مع وجود فاقد بسيط يعود إلى لزوجة الماء وإلى التأثير المتبادل بينها وبين الجو. وبمجرد تكون الموجة فإنها تتحرك في اتجاه تكونها حتى بعد أن تخمد الرياح. ويفسر ذلك ما نلاحظه أحيانا من انتفاخ طويل في بحر هادئ، فربما يكون أثرا باقيا من عاصفة نائية حدثت من عدة أيام خلت.

### الإمكانات والتقنية:

يقع أعلى تركيز لطاقة الرياح ما بين خطي عرض ٤٠°، ٦٠° من نصفى الكرة الأرضية. وتصلح المواقع حول خطوط العرض ٣٠° لاستغلال طاقة

الأمواج، حيث تسود الرياح التجارية المنتظمة لدى خطوط العرض تلك. ويمكن أن تسبب الرياح التي تهب عبر مسافات مديدة فوق المحيطين الأطلنطي والهادي أمواجاً ترتفع لعشرات الأمتار وبمسافات بين قممها تربو على المائة متر، وبمياه منزاحة تصل كتلتها إلى عدة أطنان في كل موجة. وساحلاً أوروبا والولايات المتحدة الغربيان، وسواحل نيوزيلنده واليابان تصلح على نحو خاص كمواقع لاستغلال طاقة الأمواج.

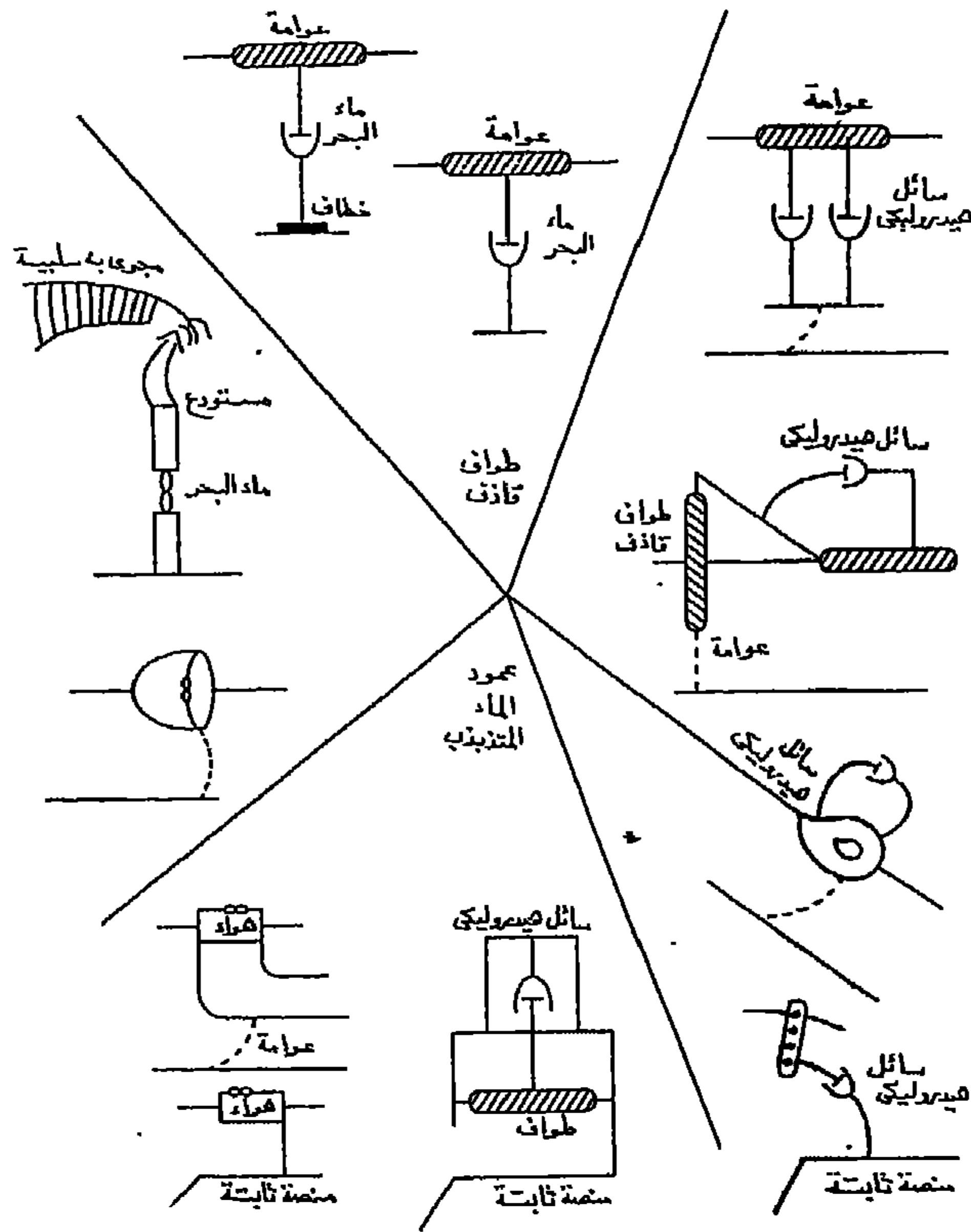
وقد بدأ في الهند نشاط البحوث والتطوير فيما يختص باستكشاف إمكانيات طاقة الأمواج في "مركز هندسة المحيطات" التابع للمعهد الهندي للتكنولوجيا بمدراس عام ١٩٨٢. وتشير التقديرات إلى أن إمكانيات طاقة الرياح السنوية على طول السواحل الهندية تتراوح ما بين ٥، ١٥ كيلوات لكل متر. ومن ثم تصل الإمكانيات نظرياً - عبر سواحل طولها نحو ٦٠٠٠ كم - إلى ٦٠٠٠٠ ميجاوات تقريباً. وعلى أية حال، فالإمكانيات الفعلية والاقتصادية تقل عن ذلك بكثير.

### التقنيات:

#### أجهزة استغلال طاقة الأمواج داخل البحر على المقياس الكبير:

تستخلص هذه الأجهزة الطاقة من البحر، محولة إياها إلى حركة ميكانيكية أو في صورة طاقة ضغط لمائع ما. وليس من اليسير تحويل طاقة الأمواج إلى كهرباء بسبب انخفاض تردد تلك الأمواج (حوالي ١,٠ هيرتز)، والتي ينبغي أن ترفع إلى سرعات الدوران الدارجة الاستعمال في المعدات الميكانيكية والكهربائية لمحطات القوى (نحو ١٥٠٠ لفة في الدقيقة). ومن أجل استخلاص الطاقة من الموجة تتعامل المعدات معها في عدة صور (انظر شكل ١٣-٢)، وتكون بعض هذه المعدات في هيئة هيكل طاف يسمى بالطوف القاذف **heaving float**.

الذى يربط بإحكام على سطح البحر أو على مقربة منه، وهناك هياكل أخرى ذات مفصلات يطلق عليها توابع السطح **surface followers** تتحرك تبعاً لشكل سطح الأمواج عن طريق جهاز له شكل حقيبة تنتفخ بالهواء مع تدفق الموجة، كما أن هناك هياكل تكتوى على عمود ماء متذبذب، يعمل ككباس يضخ الهواء (قد تكون هذه المعدات ثابتة أو طافية على سطح البحر أو تكون تحت السطح) ويجب أن يقتصر عمل كل هذه المعدات على مقاومة قوى الأمواج.



شكل (١٣ - ٢)

معدات استغلال طاقة الأمواج

## أجهزة الإخماد والإضعاف والامتصاص الموضعي:

نحصل على أقصى طاقة من الأمواج عندما يركب العديد من الأجهزة بطول محور خطى عمودى على اتجاه الموجة، وهو ما يسمى بوضع الإخماد `terminator mode`. وفى هذا الوضع تمتص الطاقة عن طريق إخماد الأمواج. وعند استخلاص الطاقة من صدر موجة لها نفس طول خط الأجهزة يكون الحد الأقصى لمعدل الاقتناص هو الواحد الصحيح. أما فى وضعية الإضعاف فيكون محور الجهاز موازيا لاتجاه الموجة. والجهاز فى هذا الوضع والذي يقتصر استخدامه على البحار الضخمة يتعرض لقوى لا يستهان بها. ولا يزيد معدل اقتناص الطاقة فى جهاز الإضعاف هذا عن ٦٢% من معدلها فى حالة جهاز إخماد له نفس الطول.

ولأجهزة الامتصاص الموضعية بعد طولى يقل عن طول الأمواج. ورغم أن أجهزة الامتصاص الموضعية هذه قادرة على اقتناص الطاقة من كل الجهات بنفس القدر، فإنها غير قادرة على اقتناص الطاقة من الأمواج الضخمة بسبب محدودية حجمها أو حيزها.

## طاقة الأمواج على المستوى الصغير على طول الخط الساحلى أو على مقربة منه:

يرتبط توليد الكهرباء من طاقة الأمواج الذى يصل حجمه إلى مستوى الجيجاوات (١٠<sup>٩</sup> وات) لتوزيعها عبر الشبكة العامة، يرتبط بالمعدات المركبة داخل البحار. أما الأجهزة الساحلية فنظرا لمحدودية المواقع المتاحة التى تصلح على الساحل، ولانخفاض إمكانيات الطاقة فى أمواجها، فلا تعد مناسبة للتوزيع للمستهلكين عبر مسافات بعيدة، وإنما باستطاعتها توفير قدرات عند مستوى الميجاوات (١٠<sup>٦</sup> وات) للوفاء بالاحتياجات المحلية، ومنافسة القدرات المولدة

بوحداث الديزل. وتشمل هذه المعدات نوع تابخان Tapchan النرويجى الذى استعمل فى مناطق ذات نطاق مدى منخفض. وتدخل الأمواج إلى (التابخان) خلال مجرى مسلوب، حيث جرى تركيزها بما يؤدي إلى زيادة ارتفاع قممها. ويتدفق الماء - عند خروجه من النهاية العليا للمجرى - إلى داخل خزان، ثم يعود إلى البحر بعد مروره على توربين. ويعمل جهاز تابخان ذو قدرة ٣٥٠ كيلووات قرب (بيرجين) بالنرويج فى الوقت الحالى. وقد تؤخذ استراتيجيات أخرى فى الحسبان، تربط الأخاديد العميقة - الطبيعية منها أو الصناعية - بعمود مياه متذبذب بتوربين آبار. ومحطات قوى الأمواج المقامة بقرب السواحل على أعماق من ١٠ إلى ٢٥ مترا، توفر إمكانات أكبر مما توفره الأجهزة الساحلية. وقدرة الموجة الواحدة أقوى عند الابتعاد عن الشاطئ، كما أن هذه المواقع تتعرض لمخاطر أقل من ناحيتى البيئة وهياكل البنية التحتية.

### البحوث والتطوير:

تتأثر محطات القوى المقامة على الخط الساحلى بمحددات بيئية وأخرى تملئها هياكل البنية التحتية. وعلى أية حال، إذا كان لطاقة الأمواج أن تسهم إسهاما ذا شأن، فلا بد وأن تأتى من أمواج المواقع البحرية أو بقرب الشواطئ، هذا وتدعم العديد من الدول الأبحاث فى مجال طاقة الأمواج، وفيما يلى أمثلة لذلك:

- شيدت الهند معدات لكسر حدة الأمواج تحتوى على جهاز عمود مياه متذبذب وتشمل توربين آبار ذا قدرة ١٥٠ كيلووات، بعيدا عن الساحل فى مدراس، ومن المخطط أن تتخطى قدرته المركبة رقم الميجاوات.

- أقامت الصين جهازا على الساحل ذا عمود مياه متذبذب بقدرة ٣ كيلو وات بأخدود صناعى وتوربين آبار بالقرب من جوانجخون على نهر بيرل.

- أنجزت اليابان بحوثا مكثفة شملت تجارب بالبحار على الأجهزة من نوعية أجهزة الإخماد الطافية والأجهزة الطافية ذات عمود المياه المتذبذب، والجهاز البندولى وجهاز عمود مياه متذبذب مقام على الشاطئ. وقد تم اختبار جهاز قدرة بالأمواج ذى عمود مياه متذبذب، وتوربين آبار بقوة ٤٠ كيلووات فى ميناء "ساكاتا" ببحر اليابان الشمالى.

- طورت السويد هيكلًا عائما - تم بالفعل اختباره - يقوم بإدارة مضخة ذات خرطوم موصلة بمرساة معزولة. كما أنها تطور جهازا دوارا فى اتجاه أفقى يستخدم فى المياه الضحلة، فى حين تقدر المملكة المتحدة مصادرهما من طاقة الأمواج داخل البحار والتي يمكن - فنيا - استغلالها بمقدار ٦ جيجاوات. ولقد تم اختبار نموذج لجهاز شاطئ ذى عمود مياه متذبذب بقوة اسمية ٧٥ كيلو وات ومردود طاقة سنوى يقدر بحوالى ٣٠٠ ميجاوات. ساعة، وذلك على الجزيرة الإسكتلندية (إسلاى Islay)، وهو يسهم فى تزويد شبكة الجزيرة بالكهرباء.

### الاقتصاديات:

تتكلف عمليات تصميم وتجميع وإقامة محطة قوى كبيرة بطاقة الأمواج بعيدا عن الشاطئ، بما يلزم لها من توصيلات كهربائية، عدة آلاف من ملايين الدولارات. وبالنظر إلى اعتبارات التعديل فى التصميم، يمكن تشييد مثل هذه المحطة للقوى على مراحل، كما يمكن البدء فى الحصول على الطاقة حتى قبل تمام إنشائها. ويمكن إقامة محطات القوى القريبة من الشاطئ على مقياس مصغر فى مكان ما ثم تقطر إلى المكان المنشود حيث يتم تركيبها. لقد أنشئت محطات لطاقة الأمواج بطول الساحل مزودة بصناديق لكسر الأمواج فى المملكة المتحدة والنرويج واليابان والهند، ولم تعد تمثل أية صعوبة فنية. ويفيد تحليل اقتصادى

أجرى لأحد عشر جهازًا لاستغلال طاقة الأمواج بأن تكلفة إنتاج الكهرباء منها (لعام ١٩٨٧) مقدرة بالسنت الأمريكي لكل كيلوات ساعة) تعبر عنها الصيغة:

سعر الكهرباء =  $112,9 \div$  قدرة الموجة مرفوعة للأس ٠,٦٤  
(حيث قدرة الموجة مقدرة بالكيلوات لكل متر). ويقام الكثير من أجهزة استغلال قدرة الأمواج في وسط البحر لإنتاج كميات أكبر من الطاقة المفيدة. ويشار إلى أن توليد هذه القوى بكميات ضخمة كفيل بخفض تكلفة إنتاج الوحدة منها بمقدار ١٥ إلى ٢٥ %.

### التأثيرات البيئية:

يمكن لطاقة الأمواج أن تحل - بصورة جزئية - محل الوقود الأحفوري، ونتيجة لهذا سينخفض انبعاث الغازات المؤدى للاحتباس الحراري وتلوث الجو. وقد تكون هناك بعض التأثيرات البيئية المحلية التي تتوقف على الموقع المنتقى. وتتضمن الفوائد منها خلق مناطق من الماء المحبوس الساكن الكفيل باجذاب الأسماك والطيور البحرية وعجول البحر والحشائش البحرية. ولا بد من أخذ التأثيرات المحتملة لنقاط منع الأنسداد المقامة بالموقع في الحسبان. وربما تتأثر البيئة الساحلية بالمثل بمحطات قوى الأمواج التي ستغير من المناخ الموجي المحلي. وقد تمثل أجهزة محطات الأمواج مصادر خطر للسفن، نظرا لقلّة ارتفاع الجزء البارز منها فوق سطح الماء. وهذه الأجهزة ربما تكون غير منظورة نسبيا حتى بالنسبة لأجهزة الرادار.





الباب الرابع عشر

الطاقة من الهيدروجين



## مقدمة:

يُنظر إلى الهيدروجين في الأغلب على أنه وقود المستقبل. فاحتراقه نظيف لا ينجم عنه تلوث، كما أنه - كوقود - سهل النقل - وباستخدام الهيدروجين ستختفي - بصورة عملية - كل مشاكل التلوث التي تصاحب استخدام أنواع الوقود الأحفوري حالياً، فبخار الماء هو المكون الرئيسي في نواتج الاحتراق. ويمكن فعليا إنتاج الوقود بفصل مكوّن الماء، ونواتج احتراقه هو ببساطة الماء، في حين يمكن الاحتفاظ بالأكاسيد النتروجينية - الناجمة كمنتج ثانوي - عند مستويات منخفضة. وكغاز، يسهل نقله عبر الأنابيب لمسافات طويلة وبتكلفة زهيدة. وعند نقاط الاستهلاك يسهل استخدامه كوقود في العديد من التطبيقات كآلات الاحتراق الداخلي وخلايا الوقود والأفران.

اكتشف الهيدروجين للمرة الأولى على يد الكيميائي البريطاني "هنري كافنديش" باعتباره نوعاً من الهواء القابل للاشتعال ثم أعيد اكتشافه عام ١٧٨٣ عن طريق الكيميائي الفرنسي "انتين لا فوازييه" باعتباره أحد مكوّن الماء. وفي سنة ١٩٢٣ استحدث "هالدين" فكرة استخدام طاقة الرياح لإنتاج الكهرباء التي يمكن استعمالها في التحليل الكهربائي لفصل مكوّن الماء للحصول على الهيدروجين. وفي عام ١٩٣٢ سجل إنين براءة اختراع فكرة استخدام الهيدروجين لتشغيل آلات الاحتراق الداخلي. كما تتبأ "سيكيرسي" في ١٩٣٨ باستخدام الهيدروجين كوقود للطائرات، وقد جرى سنة ١٩٥٦ بنجاح تشغيل طائرة تعمل بالهيدروجين عن طريق وكالة ناسا بالولايات المتحدة.

## الهيدروجين كوقود بديل:

الهيدروجين - شأنه شأن الكهرباء - حامل ثانوى للطاقة، أى أننا فى حاجة لإنتاجه - إلى طاقة أولية (نووية أو شمسية أو مائية أو حتى أحفورية). وهناك ٥ مواضيع تحتل أهمية خاصة لدى إدخال الهيدروجين كمصدر للطاقة على نحو واسع:

١ - الإنتاج.

٢ - التخزين والنقل.

٣ - تقنية استخدام الهيدروجين كمصدر للطاقة.

٤ - الأمن الصناعى.

٥ - الاقتصاديات والإدارة.

### الإنتاج:

ينتج الهيدروجين بصفة عامة بإحدى الطرق الثلاث التالية:

١ - التحليل الكهربائى للماء.

٢ - تحليل الماء بالحرارة.

٣ - الطرق الحرارية - الكيميائية.

فى الطريقة الأولى تستخدم الطاقة الكهربائية فى تحليل الماء وفى الطريقة الثانية تستعمل الطاقة الحرارية عند درجة حرارة عالية جدا (أعلى من ٣٠٠٠ درجة مئوية) فى تحليل الماء إلى هيدروجين وأكسجين. أما الطريقة الثالثة فتعد أكثر الطرق رواجاً على المنظور البعيد. فهى تعتمد على سلسلة معقدة من التفاعلات البينية بين الطاقة الأولية، والماء، وبعض المواد الكيميائية لإنتاج

الهيدروجين في درجات حرارة تقل بكثير عن تلك اللازمة لتحلل الماء بالحرارة. وتعتمد عملية التحليل الحيوي الضوئي Photobiolysis على مفعول عوامل مساعدة معينة لإنتاج الهيدروجين من الماء عن طريق مفعول ضوء الشمس في درجات الحرارة المعتادة السائدة. والهيدروجين المنتج بالتحليل الكهربائي من مصادر طاقة الرياح أو الشمس مباشرة والمستعمل في المركبات ذات خلايا الوقود لا يعطى انبعاثات خلال النقل. وهيدروجين التحليل الكهربائي بديل مستحب في مناطق مثل أوروبا، وجنوب وشرق آسيا وشمال إفريقيا وجنوب غرب الولايات المتحدة حيث المستقبل المحدود للوقود من المصادر الحيوية. ولا تتطلب مصادر الطاقة من الرياح أو من الشمس حيزا كبيرا من الأرض مقارنة بالذي تتطلبه مصادر الوقود الحيوي.

ولعل الانتقال إلى اقتصاد طاقة يمكن أن يلعب فيه الهيدروجين دورا أساسيا تحدث به طفرة لدى استخلاص الهيدروجين من المخلفات الحيوية. وهذا الهيدروجين المستخلص من النفايات الحيوية والذي يصل للمستخدمين في قطاع النقل يكلف - نمطيا - نصف تكاليف إنتاج الهيدروجين بالتحليل الكهربائي من مصادر الرياح أو الكهروضوئية... والسيارة ذات خلية وقود تعمل بالهيدروجين المستخلص من النفايات الحيوية من شأنها أن تتنافس مع سيارة تعمل بالجازولين كآلة احتراق داخلي.

والهيدروجين هو أكثر الغازات قابلية للاشتعال تحت درجة الحرارة والضغط الطبيعيين. ويمكن أن يخزن في هيئة غاز أو سائل أو مركب كيميائي. ويفضل التخزين الكيميائي للهيدروجين في الاستعمالات العملية وما شاكلها. وليس تخزين الهيدروجين في صورته السائلة بالعملية الآمنة ولا الاقتصادية، على أنه مفيد كأفضل وقود غني للصواريخ.

ويتم تخزين الهيدروجين فى السيليكا المنصهرة، وهو وسط تخزين عالى الحرارة. والتخزين تحت سطح الأرض للهيدروجين فى صورته الغازية بمقادير كبيرة جدا مطروح كبديل آمن ذى جدوى اقتصادية عالية.

#### النقل:

سيكون لنقل الهيدروجين فى حاويات تحت ضغط عال أهميته، وبصفة خاصة لشبكات التوزيع المحدودة، إلا أن نصيب هذه الوسيلة من النقل يتوقع أن يتقلص مع اكتمال إقامة المنظومات المتطورة (بما فيها شبكات خطوط الأنابيب). وستبدو أهمية نقل الهيدروجين السائل لدى التوزيع على مراكز الاستهلاك الضخم. ويمكن بالمثل نقله كما ينقل غاز الطهى، مع بعض التعديلات فى خطوط الأنابيب.

#### الاستغلال:

لقد توطدت إمكانية استخدام الهيدروجين رأسا كوقود فى المركبات. ولقد أظهرت دراسات عديدة مدى أفضلية الهيدروجين السائل كوقود للطائرات الأبطأ والأسرع من الصوت على السواء. والطائرات التى تطير بالهيدروجين قد اختبرت فعلا منذ ١٩٥٦، ويدرس حاليا تحويل طائرات الخطوط الجوية إلى نظام الدفع بالهيدروجين السائل. وفيما يتعلق باقتصاديات النقل الجوى، فالهيدروجين السائل يمثل بديلا مفضلا مقارنة بوقود الكيروسين التقليدى، حيث يلبى الأول متطلبات خفة الوزن.

#### إجراءات الأمان:

نظرا لقابليته للانتشار السريع وسهولة الاحتراق، يمثل الهيدروجين - من ناحية الأمان - مشكلة. ويلزم لمنظومات الوقود الهيدروجينى تجهيزات خاصة مثل مصائد اللهب، وحواجز الاشتعال العكسى (\*) ومجسات استشعار التسرب.

---

(\*) حاجز الاشتعال العكسى flash back arrestor : هو جهاز يستعمل بالذات فى لحام الأكسى -

أستيلين لمنع اللهب من الانتشار والإمساك بالجهاز ( المترجم )

## نواحي التقدم فى وسائل تخزين الهيدروجين:

باعتباره حامل طاقة ثانويا مستحدثا، لابد للهيدروجين كى يغزو الأسواق من أن يحقق عددا من المتطلبات مثل:

(أ) لابد أن تكون مجالات استخداماته ذات أهمية كبرى فى سوق الطاقة، وينبغى أن تتوفر فى استخدامه - ما أمكن العناية اللازمة.

(ب) يجب أن يتم نقله وتداوله بأقل تكلفة ممكنة مع توخى الأمان اللازم.

(ج) ينبغى أن يجرى تخزينه بطريقة مجدية فنيا واقتصاديا.

وفيما يتعلق بأولى المتطلبات لانتشار الهيدروجين كوقود فى السوق، فيتوجب عدم اعتباره منافسا للتطبيقات الكهربائية النمطية، وإنما يفضل اعتباره وقودا يغطى احتياجات السوق المستقبلية، ويكون استعماله النمطى إحلاله محل الوقود الأحفورى الغازى والوسائل المستعمل الآن على نطاق واسع، وعلى وجه الخصوص فى أغراض التسخين ووسائل المواصلات. وفى هذه الحالات، حيث يمكن اعتبار الكهرباء بديلا هى الأخرى، تكون عناصر تكلفة النقل والتوزيع والتخزين هى الفيصل الحاكم فى اختيار البديل.

وفيما يخص المتطلبين الآخرين، يمثل استعمال الهيدروجين ميزة جلية، فنقل الهيدروجين لمسافات طويلة وباعتماد ذات التقنية الحالية المستعملة مع الغاز الطبيعى يتوقع أن يكون أقل كلفة من خطوط نقل الكهرباء عالية الجهد، إلا أن سهوله تخزين الهيدروجين تبقى هى الميزة الأساسية التى تؤخذ فى الحسبان. وتخزين الكهرباء من وجهه النظر الفنية طبعًا هو لغة العصر، بيد أنها تعاني من انخفاض كثافة الطاقة وارتفاع التكاليف. ومن ثم فإن تخزين الكهرباء على المقياس الكبير غير ذى جدوى عمليًا. وعلى نقيض ذلك ينهض الدليل على أن كثافة الطاقة العالية، والتكاليف المنخفضة نسبيًا فى حالة نقل الهيدروجين وتخزينه تعوضان



تكلفة إنتاج الهيدروجين المرتفعة. وارتفاع تكلفة إنتاج الهيدروجين واضح في حالة اتباع طريقة الإنتاج الرئيسية مستقبلا وهي - اسميا - التحليل الكهربى، لاعتبارات التكلفة الرأسمالية ومدى كفاءة عملية التحليل الكهربى. ومن هنا، فليس هناك سوى رخص تكاليف النقل والتوزيع والتخزين ميزة تؤكد استعمال الهيدروجين على المقياس الكبير فى المستقبل فى منظومات الطاقة.

وفى حالة إنتاج الهيدروجين بالتحليل الكهربى ستتجلى مشكلات التلوث لدى موقع إنتاج الكهرباء، إلا إذا استعملت طاقة متجددة كهرومائية أو شمسية (المرجع كاربيتس Carpetis - ١٩٨٤). ولا يمكن الانتقال إلى هذه المنظومات للطاقة التى لا تستخدم الوقود الأحفورى لإنتاج الهيدروجين والكهرباء إلا بشكل تدريجى وعبر عدة عقود. وفى ذات الوقت، ستستخدم كميات هائلة من مصادر الطاقة الأحفورية، مثل النفط الخام والغاز الطبيعى بكثافة، مما سيجعل من انبعاثات ثانى أكسيد الكربون وما يصاحبها من ظاهرة الاحتباس الحرارى، مشكلة جدية. على أية حال وكما بين بيشكا Peschka حديثا (١٩٩٢) فإن عملية تكسير الميثان (تحلله بتأثير عامل مساعد) والتى سلف أن اقترحها بولينزوستين Pohlenz and stine فى ١٩٦٢، يمكن تطبيقها لإنتاج الهيدروجين من المواد الخام الأحفورية المحتم استخدامها، دون انبعاث لثانى أكسيد الكربون: وإلى جانب الهيدروجين، لا ينتج سوى الكربون فى صورته العنصرية، والذي يمكن ترسيبه كمخلفات، أو استخدامه بدلا من الفحم فى العمليات الكيميائية. وهذا الإنتاج للهيدروجين الخالى من ثانى أكسيد الكربون من شأنه أن ييسر الاستعمال الوسيط لوقود نظيف دونما حاجة إلى التبدل فى هيكل الإمداد بالطاقة الأولية الحالى. وحتى فى هذه الحالة فقابلية الهيدروجين للتخزين ذات أهمية كبرى من حيث جدواها الاقتصادية.

وللتركيز على الجوانب الفنية والاقتصادية فى تخزين الهيدروجين أهميته العظمى. ويمكن العثور على معلومات أكثر تفصيلا فى مرجعى كاربيتس

Carpetis (١٩٨٨)، وويليامسون وإديسكوتى (١٩٨٦)، واللذين يناقشان كذلك جوانب نقل الهيدروجين وتوزيعه، فى حين تتواجد معلومات خاصة عن تقنية الهيدروجين السائل فى مرجع بيشكا (١٩٩٢).

### تصنيف منظومات وأجهزة تخزين الهيدروجين:

(١) منظومات تخزين ضخمة ومثبتة: تقام منظومات التخزين هذه - بصورة نمطية - فى مواقع الإنتاج، إلى جانب نهايات خطوط المواسير وغيرها من وسائل النقل. وكشكل نمطى تشمل المنظومة - إلى جانب الأجزاء المكونة اللازمة للتخزين مثل الخزان، مكونا لمنظومة استهلاك القدرة، أى الآلات أو المصنع كالمضاغطات، ومعدات الإزالة. وبالتبعية فربما تشمل التكاليف المناظرة، تكاليف رأسمالية ملموسة تعتمد على حجم القدرة، ومفردات تكاليف توليد القدرة.

(٢) منظومات تخزين صغيرة وثابتة: وغالبا ما تستعمل كمرحلة تخزين متوسطة، كالمواقع الصناعية على سبيل المثال. وهنا بطبيعة الحال ترتبط التكاليف بحجم التخزين.

(٣) منظومات تخزين متحركة للنقل والتوزيع: وتشمل هذه المنظومات حاملات وقود رئيسية bulk carriers مثل فناطيس الهيدروجين السائل ( $LH_2$ ) أو المنظومات الأصغر مثل مقطورات الهيدروجين السائل والغازى. وتشمل عناصر التكاليف فى هذه الحالة تكاليف استثمارية يتوقف حجمها على السعة، إلى جانب تكاليف التشغيل.

(٤) مستودعات وقود متحركة: وهى عبارة عن خزانات تستعمل لتخزين الهيدروجين المستخدم كوقود للمركبات المتحركة على ظهر المركبة ذاتها. وفى هذه المركبات المتحركة بقوى الهيدروجين، ربما يؤدي

وزن الصهريج اللازم فى بعض أساليب تخزين الوقود، إلى ارتفاع مفرط فى استهلاك الوقود. وتتوقف تكاليف التشغيل لكل وحدة مسافات بدرجة كبيرة ليس فقط على تكلفة طاقة الهيدروجين فى محطة الوقود، وإنما بالمثل على أسلوب التخزين على ظهر المركبة وعلى نوع المركبة ونطاق سرعاتها.

### أساليب تخزين الهيدروجين:

سنتناول - بداية - أساليب تخزين الهيدروجين، والتي قد تقسم إلى تقليدية وأخرى مستحدثة:

#### تخزين الهيدروجين الغازى تحت ضغط:

يمكن أن يخزن الهيدروجين الغازى المضغوط فى أوعية ضغط فوق سطح الأرض أو فى نظم تخزين تحت سطحها (كالأقبية أو المستودعات الأرضية وما إلى ذلك).

#### تخزين الهيدروجين تحت سطح الأرض:

سيكون لمنظومات الإمداد بالهيدروجين فى المستقبل إنشاءات تشابه تلك المستعملة اليوم فى نظم الإمداد بالغاز الطبيعى، حيث أثبت التخزين تحت الأرض جدواه. فمن الممكن السيطرة على المشاكل الفنية الخاصة فيما يتعلق بالهيدروجين النقى (المرجع: ليندبلوم - ١٩٨٥). وحتى الآن، هناك قبو للغاز مستعمل منذ ١٩٧١ فى مدينة " كييل " لمدتها بالغاز اللازم والذي يكون الهيدروجين حتى ٦٥% منه تحت ضغط يصل إلى ١٨٠ ضغطا جويا. وتصلح الخبرة المكتسبة من تخزين الغاز الطبيعى تحت الأرض - من حيث التكاليف - للتطبيق فى حالة الهيدروجين، إذ أن منظومات تخزين الهيدروجين التى لها نفس النوعية (التكوينات الجيولوجية الطبيعية وأقبية الملح التى يتم استخراجها منها كمحلول) وتحت نفس المقدار من

نطاق ضغوط التشغيل، ستكون أعلى تكلفة من حالة تخزين الغاز الطبيعي بثلاث مرات، وذلك بالنظر إلى النسبة بين القيمة الحرارية الحجمية لكلا الغازين، ويمكن أن تتسبب تكلفة المستودع إلى وحدة الكتل من الهيدروجين المخزن، ويتراوح رقمها بين ٢، ١٠ دولارات لكل كيلو جرام منه وذلك اعتمادا على نوعية المستودع، والظروف الجيولوجية ومستوى الأسعار... إلخ. وتناظر القيمة العليا حالة أقيية الملح التي يتم استخراجها منها كمحلول، أو الأقيية حيث عملية الاستخلاص الميكانيكي. ولتخزين الهيدروجين تحت سطح الأرض أهميته الخاصة لمنظومات التخزين الثابتة على المقياس الكبير.

### منظومات تخزين الغاز المضغوط فوق سطح الأرض:

تستخدم هذه المنظومات اليوم في تخزين الغاز عبر نطاق عريض من الأحجام والضغط، فهناك أسطوانات الغاز ذات الضغط الدارج القياسي (٥٠١، ٢٠٠ ضغط جوي) وهناك الحاويات الكروية ذات الضغط المنخفض (بحجم يتخطى الـ ١٥٠٠٠ م<sup>٣</sup> وضغط من ١٢ إلى ١٦ ضغطا جويا). وهذه النطاقات تطبق أيضا في حالة الهيدروجين. وتكاليف حاويات الغاز المضغوط موثقة جيدا نظرا لانتشار استعمالها. والرقم المرجعي الذي يحسن استخدامه هو ٥٠-٩٠ دولار أمريكي / م<sup>٣</sup> تحت الضغط الجوي في حالة الحاويات الصغيرة. والحاويات الثابتة المثبتة مكانها بصورة كاملة أعلى تكلفة في الأساس (هناك قانون أسى لتناقص التكاليف مع زيادة حجم الوعاء بأس - ٠,٢٥، يؤدي استعماله لنفس التكاليف بالنسبة للحاويات الضخمة ذات الـ ١٠٠٠٠ م<sup>٣</sup> حجما) وعموما تتراوح التكاليف النوعية (لكل وحدة كتلة من الغاز) نمطيا بين ٦٠٠، ١٠٠٠ دولار أمريكي لكل كيلو جرام من الهيدروجين، أو تصل إلى الضعف لدى مقارنتها بمنظومات تخزين الأحجام الكبيرة منه تحت الأرض. وعلى ذلك لا يكون تخزين غاز الهيدروجين تحت ضغط مجديا إلا مع منظومات التخزين المتحركة المعدة

لنقل والتوزيع، أو مع التطبيقات التى تحتاج وحدات ثابتة صغيرة. وتخزين الأحجام الكبيرة من الغاز المضغوط فوق الأرض (حينما لا يتاح التخزين تحت الأرض مثلا) غير مفضل اقتصاديا إلا فى حالة التخزين لفترات زمنية قصيرة، أى مع عدد كبير من عمليات الملء كل عام. وختاما فحاويات الغاز المضغوط غير ملائمة كخزانات وقود لسيارات الركوب بالنظر أساسا لوزنها وحجمها الكبيرين.

### تخزين الهيدروجين السائل:

تتبع أحدث الصيحات فى إنتاج الهيدروجين السائل ونقله (بحرا أو بالسكك الحديدية أو على الطرق السريعة) وتخزينه. ولتخزين الهيدروجين السائل أهميته الخاصة، إذ أنه يمثل حلا طيبا من الناحيتين التقنية والاقتصادية سواء للتخزين الموسمى للأحجام الضخمة أو لصهاريج التخزين لسيارات الركوب.

وتتوافر حاويات تخزين الهيدروجين السائل من كافة الأحجام من ١٠٠ لتر وحتى ٥٠٠٠ م<sup>٣</sup> (المرجع: إديسكوتى وويليا مسون - ١٩٧٩). والأخيرة عبارة عن إناء ديوار<sup>(\*)</sup> ذى جدار مزدوج عازل للحرارة. والمادة العازلة غالبا ما تكون البيرلايت وأحيانا مما يطلق عليه المادة العازلة الفائقة *superinsulation* (للأحجام الصغيرة وكذلك للحاويات الضخمة جدا)، وتوضع فى الفراغ الواقع بين الجدارين الداخلى والخارجى. ويقل الفاقد بالبخر نتيجة فيض الحرارة المتبقى بصورة كبيرة جدا بازدياد حجم الوعاء، ويتراوح ما بين ٢، ٣% فى اليوم للأوعية الصغيرة، ١، ١٠% للحاويات كبيرة الحجم. والقيمة الأخيرة تعنى أن الفاقد نتيجة الغليان لا يمثل مشكلة بالنسبة للحاويات الضخمة. وفى حالة خزانات سيارات

---

(\*) إناء ديوار : وعاء يستخدم لحفظ الغازات المسيلة له جدار مزدوج وفراغ بين الجدارين ويطلقى وجه الجدار المواجه للفراغ بالفضة . (المترجم )

الركوب لابد من النظر بعين الاعتبار، إلى أنها تعمل تحت قدر معين من الضغط الزائد. وعلى ذلك فانبعث الهيدروجين نتيجة غليانه لا يبدأ إلا بعد بضعة أيام من عدم الاستعمال، في حين أنه مع بدء سير السيارة، يسحب الهيدروجين أولاً من الهيدروجين الغازي بالصهرريج. وتقل هذه الحقيقة من فواقد البخر. وتوضح البيانات فيما يختص بتكاليف حاويات الهيدروجين السائل أن هناك تناقصاً في التكلفة النوعية (أى بالدولار لكل م<sup>٣</sup>) على نحو نمطى مع ازدياد سعة الوعاء (بـ علاقة دالة مرفوعة للأس (-٣,٠)). ويعنى ذلك تكلفة نوعية فى حدود ٣٠ دولاراً أمريكياً لكل كيلو جرام من الهيدروجين للمستوعات الضخمة الثابتة وحتى أكثر من ٥٠٠ دولار / كج من الهيدروجين للحاويات الأصغر فى نطاق الإنتاج المعتدل. وفى جميع الأحوال تحتاج مستودعات الهيدروجين السائل الضخمة - عند التخزين فوق سطح الأرض - أقل تكلفة استثمارية.

### التخزين فى الهيدريد<sup>(\*)</sup> المعدنى:

لقد أجرى مقدار كبير من البحوث لأجل تطوير معدات تخزين الهيدروجين التى تعمل فى نطاق الضغوط المعتدلة والتى تتخطى ساعاتها ما يمكن الوصول إليه بالتخزين البسيط للغاز المضغوط (المرجع: سودا - ١٩٨٧). وتتلخص الفكرة فى ملء وعاء ضغط بمادة مثل سبيكة معدنية مكونة للهيدريد، بحيث يمكن تحت ظروف اتزان معينة من درجة الحرارة والضغط وغير ذلك، تخزين كميات كبيرة من الهيدروجين. وفى خلال تكون الهيدريد المعدنى تنقسم جزيئات الهيدروجين وتحتبس ذرات الهيدروجين فى تشبيكة ذرية من المعادن المناسبة أو السبائك المعدنية. وللحصول على الظروف التعادلية ما بين الميزات والعيوب، يتعين أن تكون كثافة التخزين فى الهيدريد المعدنى من الكبر بحيث

---

(\*) الهيدريد hydride : هو مركب من الهيدروجين مع عنصر أو مجموعة أكثر قاعدية أو ذات شحنات كهربية موجبة ( المترجم )

تعوض السليبيات الناتجة عن وجود المادة الإضافية (السبيكة المعدنية) التي ستشغل حيزاً من سعة التخزين، وعن الوزن والتكلفة الإضافيين.

وعلاوة على ذلك، فمن الأهمية بمكان – لدواعي التطبيق العملي – أن تتم السيطرة على عمليات انتقال الحرارة سواء خلال الشحن (التبريد لتصريف حرارة الهدردة) أو خلال التفريغ (التسخين في عملية إزالة الهدردة).

ولم تثبت صلاحية سوى القليل من هيدريدات المعادن لتخزين الهيدروجين عملياً من بين المواد العديدة التي أجريت عليها الاختبارات، وهي (مانيك يد  $M_2NiH_4$ )، (حيث  $s = 1,5$ ،  $2$ )،  $FeTi_x$  (حيث  $s = 1,5$ ،  $2$ )،  $TiZrCrMnH_x$  وينبغي أن تكون منظومات التخزين من هيدريدات المعادن قادرة على منافسة منظومات التخزين التقليدية للغاز المضغوط. ومن هنا ينبغي للمرء أن يتوقع ميزات للتخزين في هيدريدات المعادن في واحدة على الأقل من النواحي التالية: السعة التخزينية النوعية من حيث الحجم، السعة التخزينية النوعية من حيث الكتلة، والاستثمار النوعي وتكاليف التشغيل. والمطلب الأول تحقيقه كل الهيدريدات المعدنية مقارنة بوسائل التخزين التقليدية للغاز المضغوط، إذ أن كثافة التخزين الفعالة فيما يخص الحجم لذرات الهيدروجين المقيدة داخل تشبيكة المعدن يمكن مقارنتها بكثافة الهيدروجين السائل. أما المطلب الثاني فإنه يتحقق – فقط – بشكل هامشي: فالسعة التخزينية بدلالة الكتلة (متضمنه وزن حاوية الضغط) تتراوح ما بين نحو  $0,024$  كج من الهيدروجين في الكيلو جرام لهيدريدات الماغنسيوم والنيكل في الدرجات العالية (تصل درجة حرارة إزالة الهدردة ما بين  $250^\circ\text{C}$ ،  $350^\circ\text{C}$ )، إلى  $0,014$  كج من الهيدروجين في الكيلو جرام لهيدريدات الدرجات المنخفضة مثل هيدريدات الحديد والتيتانيوم (تصل درجة إزالة الهدردة إلى  $40^\circ\text{C}$  –  $70^\circ\text{C}$ ).

وللمقارنة، فإن حاويات الغاز المضغوط المعتادة يمكنها أن تخزن ما بين ٠,٠٠٩ إلى ٠,٠١٣ كج من الهيدروجين لكل كيلو جرام من الوزن المحتوى. وختاماً فلا يتيسر تحقيق المطلب الثالث بسبب تكاليف سبائك المعدن المهددة، إذ أنها تكلف - نمطياً - من ٢٥ دولاراً أمريكياً لكل كيلو جرام من المادة فى صورتها الجاهزة للاستعمال، وهو ما يعنى ١٧٠٠ دولار أمريكى على الأقل لكل كيلو جرام من الهيدروجين لهيدريدات الدرجات المنخفضة، علاوة على تكاليف إضافية للمبادل الحرارى وحاوية الضغط وغيرهما. ومن الأهمية بمكان ملاحظة ألا نتوقع انخفاضاً ملموساً بتغير حجم معدة التخزين، لأن الحاوية تمتلئ بسبيكة المعدن المخزنة.

وتبعاً لذلك فإن الميزة الواضحة الوحيدة فى التخزين بهيدريدات المعادن هى صغر حجم وسيلة التخزين. وهذه المسألة، إلى جانب مسائل متعلقة بالأمان - تجعل الاستعمال المستقبلى لمنظومات هيدريدات المعدن مقصوراً - فيما يبدو - على تطبيقات محددة من تخزين الهيدروجين، حين يكون الغاز المضغوط المعتاد إما أعلى كلفة أو حين لا يسمح الحيز المتاح بتطبيقه. وقد تقع هذه الحالة مع التخزين الثابت غير المتحرك فى أحجام صغيرة، أو فى منظومات التخزين المتحركة. وخزانات التخزين من الهيدريدات للمركبات التى تعمل بالهيدروجين مدمجة بشكل خاص، ومن الممكن استعمال الحرارة الخارجة من المحرك فى عملية اللاهدة *dehydrating*. إلا أن هذا ليس كافياً - على كل حال - لاستعمال هيدريدات الدرجة العالية على إطلاقه. ولهذا السبب طرح استخدام صهاريج ثنائية بها أقسام منفصلة لدرجات الحرارة العالية والمنخفضة وتم اختبارها بالفعل، وإن كانت الغلبة فى معظم الحالات لصهاريج الحديد والتيتانيوم البسيطة. وتكمن الصعوبة الرئيسية فى الاستخدام بمركبات الركوب فى وزن الصهريج بما يحمله من هيدريد معدنى ثقيل يؤدى إلى استهلاك أعلى فى الوقود. والزيادة المناظرة فى



تكلفة التشغيل من الخطورة بحيث يرجح أن يقتصر استعمال الصهاريج من هيدريدات المعادن على رحلات المسافات القصيرة (١٥٠ - ١٨٠ كيلو مترا). ويتشابه ذلك مع حالة المركبات الكهربائية التي يقتصر استعمالها على نفس النطاق بسبب ثقل البطارية أساسا.

### تكاليف تخزين الهيدروجين:

رغم سهولة التنبؤ بتكاليف تخزين الهيدروجين، فإن هناك عددا من النقاط الخاصة بكل وسيلة تخزين، يتعين أخذها في الاعتبار لتوضيح مزايا وعيوب الطرق الممكنة المختلفة لذلك. وبصفة عامة فإن الهيدروجين المودع للتخزين يكون في صورة إما غازية أو سائلة، اعتمادا على أسلوب التخزين. وتمثل تكلفة الهيدروجين عند هذه النقطة (أى لدى تفرغه في المستودع)، إلى جانب التكلفة المرتبطة بالسعة التخزينية، عنصرى التكلفة الرئيسيين اللذين يمكننا من تقدير التكاليف لموازنتها بتكاليف الأساليب الأخرى. على أية حال - وفى كثير من التطبيقات المهمة وفقا لنوع التخزين إما أن يعالج الهيدروجين قبل تخزينه، أو تعالج وحدة التخزين نفسها إبان وقت التخزين بكيفية تضيف أعباء إضافية تعتمد على الطريقة المتبعة فى تخزين الهيدروجين:

(١) فى حالة منظومات التخزين الضخمة غير المتحركة، وعند نهاية خط إنتاج النصيب الأكبر من الهيدروجين، أو نهاية خط مواسير طويل، ينبغى معالجة الغاز ذى الضغط المنخفض قبل تخزينه، أى كبسه حتى مستويات عالية من الانضغاط أو تسيله فى المكان فى حالة تخزين الهيدروجين سائلا. وتتوقف تكاليف عملية المعالجة هذه على القدرة اللازمة للكبس، وتدخل ضمن عناصر التكاليف الرأسمالية وتكاليف التشغيل لعملية التخزين.

(٢) فى حالة منظومات التخزين المتحركة لأغراض النقل والتوزيع، لابد أن تنقل وحدة التخزين ذاتها إلى موضع الاستهلاك. ولنفس وزن حاوية التخزين تعتمد تكاليف التشغيل على النسبة الوزنية للهيدروجين، والتي قد تختلف كثيرا من طريقة تخزين لأخرى. وعلى ذلك، فبالإضافة إلى التكلفة النوعية للحاوية، تمثل سعة التخزين بدلالة الوزن عاملا له أهميته فى مقارنة أساليب التخزين المتنوعة لهذا النوع من الاستهلاك.

(٣) ويتشابه ذلك مع حالة مستودعات الوقود الخاصة بالمركبات. وعلى أية حال فهناك فرقان: الأول هو أن خزان الوقود، ذو سعة صغيرة نسبيا، إذ أن الهيدروجين ينقل باعتباره وقودا (لا سلعة تجارية)، وبالتالي لا تكون لتكاليف الحاوية النوعية نفس الأهمية. وعلى الصعيد الآخر، يمثل وزن خزان الهيدروجين إضافة إلى وزن السيارة، فيرفع من الاستهلاك النوعى للوقود. وتتوقف الجدوى الاقتصادية لكل أسلوب من أساليب تخزين الهيدروجين فى هذه الحالة، ليس فقط على سعة التخزين معبرا عنها بالوزن، بل وأيضا على نطاق المسافات المختار للسيارة (المسافة بالميل التى تقطعها لكل امتلاء كامل من خزائنها).

لكل هذه المؤشرات الخاصة سيتم تحليل هذه الحالات بتفصيل أوسع. وفى المناقشة التالية لابد من معرفة البيانات النوعية (تكلفة المستودع النوعية، الاستثمارات النوعية لكل وحدة قوى محرك، استهلاك الطاقة النوعى... إلخ).

جدول (١٤-١)

القيم النمطية لتقييم تكلفة التخزين ومقارنة بين

بدائل تخزين الهيدروجين المختلفة

الطريقة	تكلفة المستودع النوعية (ع) دولار/كجم من الهيدروجين	التكاليف النوعية منسوبة لمقدار القدرة المحركة (ق) دولار /كجم من الهيدروجين	التكلفة النوعية للطاقة (ط) دولار/ كجم من الهيدروجين
أ - منظومات التخزين الضخمة: (تشمل التكلفة الإقامة والمعدات المساعدة) - التخزين تحت سطح الأرض - تخزين فوق الأرض كغاز مضغوط - التخزين في هيدريدات معدنية - تخزين الهيدروجين المسال	حوالي ١٠ ١٠٠٠ - ٢٠٠٠ ٢٠٠٠ - ٢٥٠٠ ٥٠ - ٢٠٠	حوالي ٢٥٠٠ حوالي ٢٥٠٠ حوالي ٢٥٠٠ حوالي ٣٠٠٠٠	حوالي ٠,٠٧ حوالي ٠,٠٧ حوالي ٠,٠٧ حوالي ١,٤٠

تابع جدول (١٤-١)

بيانات أخرى ذات دلالة عن تكاليف المنظومة (مقايير نسبية)			تكلفة المستودع النوعية دولار/ كجم من الهيدروجين	الطريقة
سعة التخزين لكل وحدة من حجم المستودع	سعة التخزين لكل وحدة من وزن المستودع	تكلفة الوحدة من الهيدروجين لدى مدخل وحدة التخزين		
١	١	١	١٢٠٠-١٠٠٠	ب - منظومات التخزين الصغيرة: بافتراض إنتاج متسلسل ذو حجم متوسط (تشمل التكلفة المعدات المساعدة) - أسطوانات الغاز - التخزين في هيدريدات معدنية (وحدات ثابتة بما في ذلك تكلفة المبادل الحراري) - خزان من هيدريدات معدنية للمركبات (خزان ثنائي مزدوج) - هيدروجين سائل
< ٤	حوالي ١,٤	حوالي ١	٢٠٠٠-١٨٠٠	
حوالي ٤	حوالي ٢	حوالي ١	١٩٠٠-١٧٠٠	
حوالي ٤	< ١٤	١,٤ - ٢	١٧٠٠-١٠٠٠	

## منظومة تخزين الهيدروجين الضخمة غير المتحركة:

مثل كل منظومة طاقة تمثل نسبة الاستغلال الزمنى (مقدرة بعدد الساعات فى السنة) عاملا ذا صلة وثيقة بتقدير التكلفة. وفى منظومات التخزين يقاس الاستغلال ( $\frac{س}{ع} = غ$ ) بزمان الاستعمال الفعلى من ناحية التفريغ بالمنظومة. وبالإضافة لذلك فمن الضرورى فى منظومات التخزين من إدخال عامل ثان للربط ما بين سعة تخزين الطاقة وعامل قياس الاستغلال السابق تعريفه (المرجع: كاربيتيس - ١٩٨٥).

ويعبر عن هذا المعامل الثانى بالنسبة  $\frac{ع}{غ}$ ، حيث تشير ع إلى السعة التخزينية للمستودع (بالكيلو جرام من الهيدروجين مثلا)، وتشير ع<sub>س</sub> إلى الإنتاج السنوى (كيلو جرام هيدروجين فى السنة) والمقدار ز المساوى غ.  $\frac{ع}{ع_{س}}$  يمثل وقت تفريغ المستودع بكامله (عند معدلات التفريغ المعتادة). وعلى ذلك فيمكن استعمال النسبة

$$\frac{ز}{غ} \text{ كبديل للنسبة } \frac{ع}{ع_{س}}$$

وعلى ذلك تأخذ معادلة تكلفة التخزين للمنظومة ككل الصورة:

$$ك = د \left[ \frac{ق}{غ} + \frac{ز}{غ} \right] ر + ج$$

حيث ك هى تكلفة التخزين لكل وحدة من الهيدروجين المخزن (دولار لكل كيلو جرام من الهيدروجين، ق هى التكلفة الرأسمالية النوعية المتعلقة بعنصر القدرة (دولار لكل كيلو جرام من الهيدروجين فى الساعة)، بينما تشير ر إلى التكاليف الرأسمالية النوعية للمستودع (دولار لكل كيلو جرام من الهيدروجين)، ج إلى التكلفة النوعية لعملية المعالجة (دولار لكل كيلو جرام من الهيدروجين)، أما د فترمز إلى الدفعة السنوية، والمقدرة ب ١٥%. وتستخلص بعض النتائج من

تكاليف التخزين بالفحص البسيط للقيم الواردة بالجدول (١٤-١). فعلى سبيل المثال بمقدورنا أن نستنتج أن التخزين تحت الأرض هو الأقل تكلفة على الإطلاق بين كل طرق تخزين الهيدروجين على المستوى الضخم. على أية حال، تبرز أهمية نقطة التعادل في ضوء العوامل الداخلة في دالة التكلفة. فمثلا يسود الرأي عامة بأن تكلفة تخزين الهيدروجين السائل تمنع استعمال أسلوبه في تطبيقات التخزين المعتادة. وليس ذلك بالصحيح وخاصة في حالة التخزين على نطاق ضخم. وباستخدام أرقام جدول (١٤-١) للمقارنة بطرق التخزين فوق الأرض الأخرى، يتبين انخفاض تكاليف تخزين الهيدروجين السائل إذا كانت  $\frac{Z}{G} = \frac{C_s}{C_g}$  أكبر من ٠,٠٣ ولدى التخزين لمدد طويلة تؤثر سعة التخزين  $G$  تأثيرا ذا بال على دورة رأس المال السنوية  $C_s$ . ومن ثم فالنسبة عامة ما تزيد عن ٠,٠٣ (في الحالة الحدية، عند التخزين الموسمي ومع دورة شحن وتفريغ واحدة في العام تساوى النسبة  $\frac{C_s}{C_g}$  الواحد الصحيح). وعلى الجانب الآخر ومع مدد تخزين بالغة القصر (دورات تخزين يومية على سبيل المثال) تصل النسبة  $\frac{C_s}{C_g}$  إلى  $\frac{1}{365}$ ، ويغدو تخزين الهيدروجين السائل باهظ التكاليف، وعلى ذلك يصبح تخزين الغاز مضغوطا فوق سطح الأرض البديل المحبذ من وجهة النظر الاقتصادية في هذه الحالة (إذا لم تتوفر المستودعات تحت الأرض). وهذا الموقف بطبيعة الحال مترتب على حقيقة أن تكلفة المستودع النوعية في حالة تخزين الهيدروجين سائلا، (وهي عنصر التكلفة الاستثمارية المرتبط بسعة التخزين)، منخفضة نسبيا، إلا أن المصاريف المرتبطة بمقدار القدرة المحركة عالية. ومن ثم فلا يوصى ببديل تخزين الهيدروجين السائل في حالة دورات التخزين القصيرة، حيث سعة التخزين اللازمة صغيرة (مع نسب منخفضة من  $\frac{C_s}{C_g}$ ، أي عدد كبير من دورات الشحن والتفريغ).

### منظومة تخزين الهيدروجين غير المتحركة (على المقياس الصغير):

يخزن الهيدروجين عادة في هذه الحالة دون معالجة، لذا فإن تكاليف التخزين تتوقف بصفة أساسية على الاستثمارات في المستودع وتكلفة الهيدروجين عند المدخل فقط (انظر جدول رقم ١٤ - ١). ويتوقع أن تكون تكلفة التوريد لدى موقع الشحن للهيدروجين السائل أعلى بمقدار ١,٤ مرة مقارنة بتكلفة الهيدروجين الغازي.

وتبعًا لذلك يتميز تخزين الهيدروجين السائل مع المقادير الصغيرة (في المحطات الصناعية مثلًا) فقط إذا كان المتوقع أن يستعمل الهيدروجين فيما بعد في صورته السائلة، أو إذا كانت تكلفة النقل العالية للهيدروجين الغازي إلى المحطة ستعوض تكاليف الإسالة.

### منظومة التخزين المتحركة لأغراض النقل والتوزيع:

تمت تجربة نقل الهيدروجين السائل بالمرائب إلى حد ما بالولايات المتحدة، ويمكن تدبر نقله بحرا باستخدام سفن نقل السوائل كما في حالة الغاز الطبيعي المسال، ورغم أن تكاليف نقل الهيدروجين المسال قد تزيد عن تكلفة نقل الغاز الطبيعي السائل بالسفن بمقدار ٣,٥ إلى ٤ أضعاف (بسبب محتوى الطاقة الحجمي، والحاجة إلى عزل أكثر للمستودع وغير ذلك) فإنه سيكون وسيلة ذات جدوى اقتصادية عند النقل بالبحر لمسافات طويلة، وسيصبح أكثر فاعلية بصفة خاصة إذا ما اقترن بتخزين الهيدروجين السائل عند نقطة الاستهلاك (النهاية).

وفيما يختص بالنقل بالسكك الحديدية، وعلى الطرق البرية فيشيع حاليًا استعمال أسطوانات الغاز المضغوط، وإن عابه عدم جدواه من الناحية الاقتصادية، فليس بوسع شاحنة سعتها ٢٥ طنًا (مثلًا) أن تنقل أكثر من ٢٧٠ كيلو جرامًا من الهيدروجين، والتكلفة المناظرة لنقل الهيدروجين السائل بالسكك الحديدية أو على

الطرق أقل بكثير (ويزداد الفرق مع المسافات الطويلة) رغم التكلفة الأعلى لمركبات نقل الهيدروجين السائل، ويرجع ذلك إلى كثافة النقل الأعلى نتيجة ارتفاع السعة النوعية (منسوبة للوزن بالنسبة لمستودعات الهيدروجين السائل) (انظر الجدول رقم ١٤ - ١)، وفي بعض الحالات يمكن أن يعوض ارتفاع كثافة النقل حتى تكاليف الإسالة، والتسليمات لكبار المستهلكين الهيدروجين الغازي في الولايات المتحدة وكندا غالبًا ما تتم بمركبات بأوعية هيدروجين سائل، يضخ عند الموقع إلى مستويات أعلى من الضغط، ثم يبخر ويغذى داخل الموقع المستهلك في صورة غاز ذي ضغط عال، وترتكز اقتصاديات هذا الأسلوب على حقيقة أن مقطورة مفردة بخزان يمكنها تسليم نفس الكمية من الهيدروجين الغازي التي تحملها - نمطيًا - ١٥ إلى ٢٠ شاحنة من الأسطوانات المضغوطة.

### مستودعات الوقود المتحركة:

لا يرجح مستقبلًا تشغيل المركبات بالهيدروجين إلا من خلال بديلين للتخزين هما منظومات التخزين بهيدريدات المعادن أو خزانات الهيدروجين السائل، ومنظومات تخزين الغاز تحت ضغط عال ذات التقنية المتقدمة تقف على قدم المساواة - من حيث الوزن - مع خزانات هيدريدات المعادن، وإن كانت تحتاج حيزًا أكبر (انظر بجدول ١٤ - ١ السعات التخزينية منسوبة للوزن والحجم)، كما أن مشاكل الأمان بالنسبة للمركبات أكثر خطورة.

وقد تأكدت صلاحية كل من هيدريدات المعادن، والهيدروجين المسال عمليًا في المركبات (المرجع: بيشكا ١٩٨٧، ديلوتشي ١٩٨٩) وتبدو خزانات هيدريدات المعادن للوهلة الأولى البديل المفضل، حيث أنها تشحن بهيدروجين غازي (تكاليف وقود أقل في محطة الملء) ولا تعاني من الفوائد عن طريق الغليان التي تعاني منها خزانات الهيدروجين السائل عند عدم الاستعمال لفترات مديدة، وعلى أية حال فهناك العديد من الجوانب الأخرى مما ينبغي أخذه في الحسبان، وأهمها تأثير



الوزن الهائل للخران على أداء المركبة وعلى تكاليف التشغيل، وبالنسبة لهيدريدات المعادن لا تتجاوز سعة التخزين الفعالة (شاملة وزن حاوية التخزين تحت ضغط ٥٠ جوى) مقدار ٠,٠١٨ كجم من وقود الهيدروجين لكل كيلو جرام من وزن الخزان الكلى، حتى مع الخزانات المشتركة، ويتضح عيب هذا الاحتياج لخران هائل الوزن عند تقدير كفاءة الطاقة الشاملة للمركبة، وهو ما يكافئ تكلفة وقود التشغيل، وتبين المراجع (كاربيتس ١٩٨٢، ١٩٨٨) أن كفاءة الطاقة لمركبة ما تقدر بالصيغة:

$$\xi = \xi_r \xi_m \xi_n (1 - \frac{n_m r}{n_o \xi_m})$$

حيث  $\xi$  هي النسبة بين الشغل المستفاد خلال دورة قيادة قياسية وكمية الطاقة الأولية المستخدمة فى إنتاج الوقود المستهلك فى إكمال هذه الدورة،  $\xi_r$  هي كفاءة الطاقة الكلية لإنتاج الوقود، والنقل والتوزيع وعملية التزويد بالوقود،  $\xi_m$  ترمز إلى الكفاءة الميكانيكية الفعلية لمنظومة قيادة المركبة (من المحرك وحتى الإطارات)، و  $\xi_n$  هي النسبة بين الحمل ووزن المركبة الكلى،  $n_m$  هي الطاقة الميكانيكية النوعية اللازمة لدورة القيادة القياسية (بالكيلو وات ساعة لكل كجم. كيلو متر)،  $r$  هو نطاق حركة المركبة ابتداءً من تمام امتلاء الخزان (بالكيلو متر)،  $n_o$  تمثل الكتلة المرتبطة بمحتوى الطاقة النوعى فى الوقود (كيلو وات ساعة لكل كيلو جرام من وزن الخزان).

وحيث إن القيمة الحرارية الدنيا للهيدروجين تبلغ حوالى ٣٣,٣ كيلو وات ساعة لكل كيلو جرام منه فإن قيمة  $n_o = ٠,٥$  كيلو وات / كجم فى حالة التخزين فى هيدريدات (حيث هناك ٠,٠١٥ كيلو جرام من الهيدروجين لكل كيلو جرام) وفى حالة الهيدروجين السائل تزيد القيمة المناظرة لأكثر من سبعة أضعاف ونصف ضعف.

ومن الواضح أن أقصى كفاءة شاملة للمركبة - وطبقا للتعريف أعلاه تعنى الحد الأدنى من استهلاك الوقود وبالتبعية الحد الأدنى من نفقات التشغيل، إذا ما قارنا الوقود المنتج من نفس مصدر الطاقة الأولى.

وتتبع من العلاقة المذكورة سابقاً نتيجة طريفة بخصوص كفاءة المركبة، وهى أنه باستعمال خزانات طاقة ذات كتلة نوعية أقل، لا تمثل المسافة التى تقطعها المركبة عاملاً مستقلاً فى التصميم، حيث إن الكفاءة تتناقص بسرعة مع ازدياد هذه المسافة، والحد النظرى حيث تقارب الكفاءة الصفر (أو تقارب التكلفة النوعية اللانهاية) ووفقاً للعلاقة المذكورة آنفاً هو  $n = n_w \times \eta_m \div n_m$

وتصل قيمة  $n_m$  لأغلب دورات القيادة المعيارية إلى زهاء  $1,4 \times 10^{-4}$ .

ولمركبة تسير بالهيدروجين قيمة  $n_w$  لها = 0,5 (كيلو وات ساعة من طاقة الوقود لكل كيلو جرام من وزن الخزان)، وآلة احتراق داخلى لها كفاءة  $\eta_m = 0,18$ ، تصل قيمة  $n$  إلى نحو 650 كيلو مترًا، أو لمركبة بالكهرباء ذات تقنية متقدمة فى تخزين البطارية تكون القيم المناظرة هى  $n_w = 0,04$ ،  $\eta_m = 0,6$ ،  $n = 215$  كيلو مترًا (للبطاريات المستقبلية (ص كب) حيث  $n_w = 0,1$  تكون  $n = 430$  كيلو مترًا) وهذه القيم بطبيعة الحال تمثل الحد الأقصى النظرى، أما فى التصميمات العملية بوزن خزان واقتصاديات وقود مقبولين، فقد تأكد أن قيمة المدى  $n$  تبلغ 50% من هذه القيم النظرية.

وهناك حقيقة أخرى لها طرافتها، وهى أنه عندما نقارن تخزين الهيدريد المعدنى والهيدروجين السائل فى المركبات التى تعمل بالهيدروجين نجد أن اعتماد الكفاءة على العناصر سالفة الذكر تؤدى إلى ظروف تعادلية واضحة وقاطعة، وسنفترض لهذه المقارنة نفس قيمة  $n_m$  (نفس دورة القيادة المعيارية) كما سبق،  $\eta_m$  للمركبات الاعتيادية ذات آلات الاحتراق الداخلى، وعلاوة على ذلك سنفترض نفس

المعامل  $\epsilon$  ل كلا المركبتين موضوع المقارنة. ستعتمد الظروف التعادلية على المقادير  $\epsilon$ ،  $n$ ،  $r$ ،  $R$ .

ففي حالة التخزين كسائل تكون  $\epsilon$  و  $R$  أقل من نظيرتها في حالة الهيدريد المعدني بمعامل قدره ١,٤٥ بسبب تكلفة الإسالة والفاقد في أثناء النقل، وعلى الجانب الآخر يكون محتوى الطاقة النوعي منسوبًا للوزن  $n$  في حالة تخزين الهيدروجين المسال، أكبر من نظيره في حالة الهيدريد المعدني حيث  $n = ٠,٥$  بمقدار سبع مرات ونصف، وبإدخال هذه العلاقات في معادلة كفاءة الطاقة للمركبة نجد أن:

$\epsilon$  في حالة الهيدروجين المسال أعلى من  $\epsilon$  في حالة الهيدريد المعدني إذا كانت  $R$  تزيد على المقدار ٢٢٠ كيلو متر، ويعنى هذا ببساطة أنه إذا كان اختيار سعة خزان الوقود يتم لمسافة تزيد عن ٢٢٠ كيلو مترًا، فإن الإنفاق الكلى على بند الطاقة (وتكاليف التشغيل بالنسبة للوقود) ستكون أقل في حالة الهيدروجين المسال (رغم نفقات الإسالة وتكلفة الوقود العالية لدى محطة الترموين به).

**الباب الخامس عشر**

**محطات القوى الكهرومائية متناهية الصغر**



## مقدمة توليد القدرة:

مع قدم تقنية توليد القدرة هيدروليكية فإنها ستبرز كمصدر استراتيجي لإنتاج الكهرباء في العقود المستقبلية، وبصفة خاصة في الدول النامية، حيث يتواجد أغلب مخزون العالم من هذه الإمكانيات غير المستغلة. وعلى الرغم من ضخامة المخزون العالمي من القدرة الهيدروليكية، فإن العديد من العوامل تحد من إمكان استغلالها. ومع ذلك يكتنف الكثير من عدم التيقن التقديرات الراهنة لهذا المخزون. وهناك عدد من التقنيات الحاكمة في سبيل الحد من طبيعته المتقلبة لانسياب مياه الأنهار، أسهمت في الاستغلال الناجح لمصادر الطاقة الهيدروولوجية سواء على المقياس الصغير أو الكبير، مثل التخزين بالضغط، وإعادة تأهيل المصانع العتيقة والإجراءات التعويضية. وعلى الرغم من التقدم التكنولوجي، فإن المناقشات تدور حول أن الآثار الاجتماعية والبيئية هي ما يحد - أساسا - ويمثل مصدر عدم التأكد الذي يؤثر في تطور القدرة الهيدروليكية. والكهرباء المولدة بالقوى المائية والتي تعتمد - في خاتمة المطاف - على بخر المياه الطبيعي بفعل الطاقة الشمسية، هي مصدر الطاقة المتجددة الوحيد الذي يستعمل على نطاق واسع اليوم في توليد الكهرباء. ففي عام ١٩٨٦ أسهمت بنسبة ١٤,٥ % من الكهرباء المولدة على مستوى العالم. وفي سبيل تسخير الطاقة المائية نجد للمصادر المائية سواء الصغيرة أو متناهية الصغر، أهميتها وضرورة تطويرها.

على أية حال، يتم التحقق الآن من العواقب البيئية والاجتماعية العديدة المترتبة على المشروعات المائية الضخمة، والتي تشمل ضمن ما تشمل تشييد السدود الضخمة. وتتمثل هذه العواقب في غمر الغابات والأراضي الزراعية، ومن

ثم فقدانها، والحاجة إلى إعادة تسكين الناس ممن كانوا يعيشون فى المناطق المغمورة بالماء واحتمالات تفاقم الخواص الزلزالية *seismicity*، نتيجة لأحجام المياه المحتبسة الهائلة، والتأثيرات المحتملة على الثروة السمكية وتراكم الغرين. ولهذه الأسباب هناك اتجاه نحو تحييد المشروعات الهيدروليكية الصغيرة.

### تحويل الشغل الميكانيكى إلى كهرباء

تتولد القدرة الكهربائية فى محطة القوى الكهرومائية، حينما يطلق الماء المخزن خلف سد ما، ليدير عنفات (توربينات) متصلة بمولدات. وتقلل الكهرباء إلى الأسواق وفى النهاية إلى المستهلكين النهائيين.

وللسدود التى تبنى معترضة سبيل تيارات المياه هدفان: أحدهما هو رفع منسوب المياه، ومن ثم زيادة طاقة وضعها، أو الساقط الهيدروليكي *hydraulic head*، والهدف الثانى هو إيجاد احتياطى مائى لتعويض التقلبات فى معدل سريان النهر أو فى مستويات الطلب على القدرة. وتختلف درجة أهمية كل من هذين الغرضين من موقع لآخر، فبعض السدود ليس لها - عمليا - أية طاقة استيعابية احتياطية.

وتحول التوربينات الهيدروليكية الطاقة من الماء ذى المنسوب المرتفع، أو من تيار مائى متدفق إلى طاقة ميكانيكية تدير عمودا دوارا. وفى حين تستعمل سواقي المياه من الطراز العتيق تأثير ثقل الماء مباشرة، تعمل التوربينات الهيدروليكية الحديثة وفقا لمبدأ القوة الدافعة *impulse*، أو مبدأ رد الفعل الذى يحول الضغط وطاقة الحركة إلى طاقة حركية دورانية.

ويحرك عمود التوربين الدوار، مولدا كهربائيا يحول القدرة الميكانيكية إلى قدرة كهربائية. وهناك ثلاثة أنواع متاحة للمولدات للاستعمال فى محطات القوى

المائية. فالمحطات ذات قدرة مركبة منخفضة هناك مولد الحث ذو تيار متردد أو تيار ثابت، وللقدرات المركبة الأعلى يستعمل النوع التقليدي (المتزامن synchronous). وتتكون مفردات نقل القدرة من محطة قوى ثانوية لرفع الجهد أو إرساله إلى المحطات المولدة للكهرباء، ثم محطة ثانوية فرعية لخفض الجهد أو الاستلام لدى طرف الاستهلاك التجارى، وخطوط النقل الواصلة بينهما، ومجموعة المفاتيح الكهربائية الوسيطة - فى بعض الحالات.

### إمكانات وآفاق استخدام محطات القوى الكهرومائية

تمد محطات القوى الكهرومائية العالم فى الوقت الراهن بنسبة ٢٣% من احتياجاته من الكهرباء. وتقدر المصادر الكهرومائية على مستوى العالم - والتي تعد فى حكم المجدية اقتصاديا وفنيا تحت الظروف الراهنة بزهاء ٢,٤ مليون ميغاوات (كقدرة لا يتيسر تركيبها). ولو أن الطاقات الممكنة طبقا للتقديرات قد جرى استغلالها بصورة كاملة، لأسهمت القدرة المائية بنحو ٣٧,٣ إناجول من الطاقة سنويا، بافتراض معدل استغلال للطاقة المركبة قدره ٥٠%. ويتواجد القسم الأكبر من الإمكانات الكهرومائية غير المستغلة فى العالم النامى، إذ أن المناطق المتقدمة قد استغلت بالفعل نصيبا كبيرا من مواقعها الهيدروليكية المواتية لذلك. وتحصل كثير من الدول على غالبية احتياجاتها الكهربائية من المصادر الهيدروليكية، فقد طورت الدول والمناطق التى تتمتع بمصادر هيدروليكية وفيرة عموما وسائلها لتغطية الاحتياجات للكهرباء وكما هو مبين بجدول (١٥-١):



### جدول (١٥-١)

قائمة مختارة للدول التي تحصل على أغلب الطاقة الكهربائية  
من المصادر المائية

الدولة	نصيب القدرة الكهربائية من المصادر المائية %
غانا	٩٩
النرويج	٩٩
زامبيا	٩٩
موزمبيق	٩٦
زائير	٩٥
البرازيل	٨٧
البرتغال	٨٧
نيوزيلندا	٧٥
نيجال	٧٤
سويسرا	٧٤
النمسا	٦٧
كندا	٦٧

المصدر: دانييل دويني: "أنهار الطاقة، إمكانيات القدرة المائية" بحث world watch رقم ٤٤،

ص ١٠، عام ١٩٨١

## محطات القوى المائية الصغيرة

لم يتم بعد التوصل إلى إجماع ما حول تعريف مصطلح المحطات الصغيرة، والصغيرة جداً، ومتناهية الصغر. ففي الولايات المتحدة توصف محطات القوى المائية الميكرونية (متناهية الصغر) بتلك ذات القدرات الأقل من ١٠٠ كيلووات، ومحطات القوى المائية الصغيرة جداً بتلك التي تتراوح قدراتها ما بين ١٠٠، ١٠٠٠ كيلووات، ومحطات القوى المائية الصغيرة هي ذات القدرات ما بين ١، ٣٠ ميغاوات، ويبين الجدول (١٥-٢) التعريف المتبع لمفهوم محطات القوى المائية الصغيرة وشديدة الصغر ومتناهية الصغر للبلدان المختلفة ووفقاً لما هو بالمراجع:

نطاقات القدرة			البلد
الصغيرة (ميغاوات)	شديدة الصغر (كيلووات)	متناهية الصغر (كيلووات)	
٣٠ - ١	١٠٠٠ - ١٠٠	١٠٠ >	الولايات المتحدة
-	٥٠٠ >	-	الصين
٣٠ - ٠,١	-	١٠٠ >	الاتحاد السوفيتي (سابقاً)
-	-	٥٠٠٠ - ٥	فرنسا
١٥ - ١	١٠٠٠ - ١٠١	١٠٠ >	الهند
٣٠ - ١	١٠٠٠ - ١٠٠	١٠٠ >	البرازيل
١٠ >	١٠٠٠ >	١٠٠ >	بلاد أخرى

وقد قدمت هيئات دولية عديدة معونات فنية ومالية لتشييد محطات القوى المائية الصغيرة في البلاد النامية، فقد عمل "المركز السويسري للتقنيات القوية" - على سبيل المثال - في نيبال. وعاونت "الوكالة الألمانية للتعاون التقني" الباكستان والفلبين، كما ساعدت "الوكالة النرويجية للتنمية الدولية" في إقامة محطات قوى مائية من النطاق شديد الصغر في موزمبيق. ويأخذ كل من هذه المشروعات في اعتباره المردود الاقتصادي، والقبول الاجتماعي وإدارة وتشغيل المحطة في سياق العادات المحلية السائدة.

ولمحطات القوى المائية الصغيرة عيب وحيد، فهي غالباً ماتحصل على طاقتها من الأنهار الجارية، وتفتقر إلى المستودعات ذات السعة الكافية لتخزين المياه، وبالتالي فقد تحدث تغيرات موسمية ضخمة في منتوجها من الطاقة وفقاً لطبيعة الموقع الهيدرولوجية، وتعتمد صلاحية محطات التوليد المائية الصغيرة للاستعمال على المدى الطويل، على الكهرباء البديلة لها، والتي تنتج إما محلياً أو تستمد من الشبكة العمومية

### تصميم المحطات الكهرومائية متناهية الصغر (الميكرونية)

حظيت تصميمات المحطات الكهرومائية متناهية الصغر على قسط عظيم من الاهتمام من عدة جوانب: أولاً باعتبارها مصدراً ذا حجم مناسب وقابلاً للاستعمال للطاقة المتجددة، وثانياً لكونها أسلوباً معتدلاً التكلفة الاستثمارية للإمداد بالكهرباء في المناطق التي تعاني من نقص التنمية. والكهرباء هي أكثر صور الطاقة إراحة... حيث تستغل في الإنارة والتدفئة والتطبيقات الصناعية. واستخدام الكهرباء في مثل هذه النواحي لا ينطوي على تلويث للبيئة، ومن ثم فيمكن أن يلعب دوراً ذا أهمية في الحفاظ على البيئة وتأمين سلامتها. وبالإمكان كهربة

المناطق ذات التضاريس الوعرة بمد خطوط الشبكة إلى المناطق الداخلية، أو بتوليد الكهرباء من بعض المصادر المحلية كالمواد الحيوية والإشعاع الشمسي والرياح أو الجداول المائية الجارية. والجداول الجارية على مدار السنة التي تتساب عبر منحدرات مناطق التلال شديدة الانحدار هي أحد أكثر المواقع المحلية ملائمة للحصول على الطاقة. ولهذا السبب فإن احتياجات مناطق التلال من الطاقة بطبيعتها لا مركزية ومتقطعة غير متواصلة. وبالتالي فليس بالضرورة أن يكون توليد الطاقة مركزيا ومنظومات نقلها الأساس في مد مزايا الكهرباء إلى المناطق الريفية النائية. وتقع أغلبية القرى في مناطق التلال على مقربة من الجداول الجارية على مدار السنة، ومن ثم فبمقدور المنظومات الكهرومائية الميكرونية أن تلبي احتياجات الطاقة في معظم المناطق ذات التلال الوعرة، وهو ما يساعد في الحفاظ على ثروة الغابات المحلية التي جرد منها إقليم الهيمالايا على نحو عشوائي شنيع.

يقع عدد كبير من القرى بمناطق التلال قرب مجار مائية ذات إمكانية لتوليد الطاقة الكهرومائية على المقياس الميكروني (متناهي الصغر) ، ومن هنا فيمكن كهربة العديد من القرى التي لم تدخلها الكهرباء من خلال خطط بتشيد محطات كهرومائية ميكرونية. ويخطط لهذه المحطات الميكرونية كي تولد مقادير محدودة من القوى المحركة. وتخضع تكلفة المحطة الكهرومائية متناهية الصغر لاعتبارات الموقع، وتعتمد بنسبة كبيرة على السعة المركبة، وكمية التدفق (التصرف) والساقط الهيدروليكي المتاح وطبوغرافية المنطقة والمسافة إلى مواقع الاستهلاك من محطة القوى ومعامل الحمل load factor، إلخ.

وتكلفة توليد الكهرباء من المحطات الكهرومائية الميكرونية هي الأقل على وجه الإطلاق بين كل برامج الطاقة المتجددة الأخرى التي جرى تنفيذها على مقياس صغير، مثل الغاز الحيوي، والخلايا الكهروضوئية والمولدات عن طريق

الرياح. ويمكن استخدام الكهرباء المولدة في المحطات الكهرومائية الميكرونية لأغراض الإنارة والتسخين وتوفير مياه الشرب والرى والصناعات الكوخية(\*) وما إلى ذلك، ومن هنا فإن لها تأثيرات اجتماعية واقتصادية بعيدة المدى على أسلوب معيشة السكان المحليين.

### مفهوم المحطات الكهرومائية الميكرونية وإمكانات إقامتها في الهند:

تتسم المناطق الشمالية والشمالية الشرقية من الهند بطبيعتها الجبلية وكثرة التلال بها، إلى جانب تناثر التجمعات السكنية. ويتعذر الوصول لهذه المناطق، كما أن تكاليف مد خطوط شبكة الكهرباء العمومية إليها من السهول عسير ومكلف، كما أن إقامة محطات ديزل في مثل هذه المناطق غير اقتصادية لارتفاع تكلفة النقل. بيد أن بهذه المناطق كثيرا من الجداول الجارية بين التلال التي يمكن استغلالها في توليد الكهرباء من خلال المحطات الكهرومائية الميكرونية، ويمكن توزيع الطاقة للقرى المحيطة عن طريق شبكات منفصلة.

ومن شأن تطوير شبكة رى واسعة عبر البلاد أن يمثل مصدرا ضخما للمحطات المائية الصغيرة. ففي قنوات الرى يصل الساقط إلى ٢ م وربما أكثر، وهو ما يمكن استغلاله لتوليد القوى. وبسبب انخفاض الساقط ترتفع مقادير التدفق (التصرف) وتميل تكاليف الإنشاءات المدنية إلى الارتفاع مما ينعكس على ارتفاع تكلفة المشروعات. وتقدر إمكانات القدرة الكهرومائية الممكن توليدها طبقا

---

(\*) الصناعات الكوخية Cottage industries: مصطلح يطلق على الصناعات التي يؤديها العمال وهم بمنزلهم كالغزل والنسيج والتطريز، والتي انتشرت على نطاق واسع قبل الثورة الصناعية (المترجم)

للخطتين المتوسطة والطويلة بالهند بحوالى ٩٠٠٠٠ ميجاوات وبمعامل حمل متوسطه ٦٠ %، فى حين أن إمكانات المحطات الكهرومائية الصغيرة بالبلاد تبلغ ٥٠٠٠ ميجاوات تقريبا يتوقع أن يقع ٣٠٠٠ ميجاوات منها فى نطاق ساقط منخفض. وتطور هيئة مصادر الطاقة غير التقليدية برامج بحوث وتطوير إنشاء محطات كهرومائية ذات ساقط مائى ضئيل وعلى مستوى صغير وصالحة للتطبيق فنياً واقتصادياً، وتطوير القدرة المائية بربطها بمصادر الطاقة المتجددة الأخرى. ويبين الجدول رقم (١٥-٣) بيانا بالمحطات التى أقامتها هيئة مصادر الطاقة غير التقليدية من محطات القوى ذات الساقط المائى العالى أو المتوسط أو شديد الصغر:

جدول (١٥-٣)

المحطات الكهرومائية الميكرونية التى أقامتها هيئة مصادر الطاقة غير التقليدية

رتبة الساقط	الموقع	السعة المركبة	الساقط الصافى	التصرف م <sup>٣</sup> /ث
مرتفع	جوبال (هيما تشال براديش)	١٠٠ × ١ كيلوات	٨٨ م	٠,١٧
متوسط	مانالى (هيما تشال براديش)	١٠٠ × ٢ كيلوات	٤٠ م	٠,٨٠
شديد للصغر	كاكروى (هاريانا)	١٠٠ × ٣ كيلوات	١,٩ م	٣١,١٥
منخفض	رالا باتيندا (البنجاب)	٢٠٠ × ١ كيلوات	٣ م	٨,٥
	جانجا كانال - ساهارانبور (أوتار براديش)	١٢٥ × ١ كيلوات	٥,٥ م	٥,٦٦
				لفترة ١٧ ساعة

## اختيار الموقع:

يراعى عند التخطيط لمشروع محطة كهرومائية ميكرونية العوامل التالية:

### معدل تدفق المياه:

لابد من العثور على البيانات عن الحد الأدنى للتأكد من القدرة المولدة، ويلزم بيانات عن فترة سنة على الأقل. وبالنسبة للساقط عبر قنوات مائية يلزم بيانات لنفس الفترة لتحديد أدنى حد لتدفق المياه.

### الساقط المائي الكلى وصافى الساقط المائي:

الساقط المائي الكلى هو الفرق بين منسوبى الماء فى مبنى التحويل diversion structure ، ومنسوبه عند المخرج من المحطة الكهرومائية. والساقط المائي الحقيقى المتاح لتوليد القوى هو ما يطلق عليه الساقط الصافى. ولحساب قيمة الساقط الصافى نظريا ، ينبغى أن يطرح من الساقط الكلى الفواقد فى الساقط نتيجة مرور المياه من مبنى التحويل إلى مدخل قناة أو بوابة للتحكم فى تدفقها وفى البوابات، وما إلى ذلك.

### مستوى الطلب على الكهرباء وتقدير مقدار القدرة المولدة:

يمكن تقدير حجم الطلب على الكهرباء - فى المناطق المنعزلة - بناءً على عدد الوحدات السكنية، وتعداد السكان والصناعات القائمة والمباني المؤسسية إلى جانب التوسع المستقبلى المتوقع. ويمثل معامل الحمل عاملاً مهماً وحاسماً عند وضع خطة إقامة محطة كهرومائية ميكرونية. ويحسب مستوى القدرة المتاحة من المعادلة:-

$$Q = \eta \cdot H \cdot C^{(*)}$$

حيث  $Q$  = القدرة المولدة بالكيلووات

$H$  = الحد الأدنى من تدفق المياه م<sup>٣</sup> / ث

$C$  = الساقط الصافي بالمتر

$\eta$  = معامل الكفاءة الكلى الذى يدخل فيه كفاءة التوربين و المولد

(وقيمته حوالى ٠,٧٥)

مكونات محطات القوى الكهرومائية الميكرونية الأساسية

تتكون محطة القوى الكهرومائية الميكرونية من الأجزاء الأساسية التالية:

(١) مبنى التفريق:

يفضل عمل سد فى هيئة أخدود فى حالة مبنى التفريق. وللمحطات الكهرومائية الميكرونية والصغيرة لاقى بناء سد من الشجيرات والجلاميد الضخمة نجاحا وقبولا اقتصاديا فى كثير من الحالات.

ويعتمد اختيار نوع مبنى التفريق على سعة المحطة وطبوغرافية المنطقة وملامحها الجيولوجية.

(٢) موصل المياه:

تمد مجارى أو مواسير من الخرسانة الأسمنتية المسلحة من المأخذ مباشرة ، يتبعها نوع تقليدى من القنوات المفتوحة. ويمكن إدخال استعمال المواسير الصلب فى الاعتبار إذا ما خيف من حدوث انهيارات فى الصخور أو الانقراض.

---

(\*) يراعى فى المعادلة بهذه الصورة إدخال معامل للتحويل لاختلاف وحدات طرفى المعادلة (المترجم)



### ٣) أحواض إزالة العوالق silt:

والغرض منها اصطیاد المواد العالقة والحصوات. ويستعمل حوض إزالة عند مأخذ (فتحة) موصل المياه. وتنخفض هنا سرعة السريان بنسبة محسوسة ، ويتوقف ذلك على حجم الأجسام المراد إزالتها فى غرفة الإزالة، والتي تفرغ أولاً بأول فى أقرب بالوعة تصريف طبقاً للاحتياج.

### ٤) تركيبات الحوض الابتدائى والفائض:

يمكن تركيب حوض ابتدائى فى تصميمات المحطات المائية الميكرونية لضمان الحد من الساقط المائى عبر مأخذ القناة الصناعية التى تتحكم فى تدفق المياه لمنع دخول الهواء بها، ويعتبر عمق الثلاثة أمتار من المخزون كافياً لذلك، وتركب بالمثل ترتيبات لتصريف الماء الفائض قرب الحوض الابتدائى الذى ليس هناك حاجة إليه لتوليد الكهرباء.

### ٥) البوابة الصناعية والخطاف:

ينتقل الماء - وهو تحت ضغط - من الحوض الابتدائى خلال أنابيب البوابة الصناعية إلى آلات التوليد وتدعم المواسير بكتل إرسائية على أكواع وعادة ما تستعمل كتل ممتدة طولياً saddle blocks، وينبغى ضمان استقرار الطبقات تحت القناة الصناعية والمرساة والكتل قبل إتمام إنشاء القناة الصناعية.

### ٦) مبنى محطة القوى الرئيسية:

يتعين - لحماية وحدات التوليد ومعدات التحكم - أن يشيد مبنى محطة القوى من واقع استغلال المواد المحلية وأن يتمتع بالبساطة، ويصل ارتفاعه فى المتوسط من ٣ إلى ٥ أمتار، ويتوقف حجم المبنى على عدد وحدات التوليد والمسافات بين محاورها والمساحة اللازمة للمعدات الأخرى وساحة الصيانة.

## ٧) قناة الصرف:

يجب أن تكون ذات ميل وسعة كافيين بحيث يتم التصريف من الآلات فى الحال، وتتصل قناة الصرف الخاصة بكل وحدة بقناة عمومية خارج مبنى محطة القوى لتصريف المياه فى نهر قريب.

## ٨) المعدات المساعدة ومحطة التوليد:

المعدات الميكانيكية والكهربية اللازمة للمحطات المائية الصغيرة هى:

أ) بوابات وصمامات تحكم فى مسار المياه.

ب) توربين مائى ومولد مع ما يلزمه من معدات كهربية للحماية.

ج) أوناش وآلات رفع وتحريك.

د) محول كهربى لرفع الجهد.

هـ) نظام توصيل أرضى للمعدات والآلات والمفاتيح الكهربائية.

و) نظام مكافحة الحرائق.

ولتلافى أية مشاكل جيولوجية يتعين إجراء فحص جيولوجى على المنطقة المرشحة لإقامة المحطة.

## التوربينات والمولدات:

فى توليد القوى بالمحطات المائية الميكرونية، يحول التوربين الطاقة المائية إلى طاقة ميكانيكية فى شكل حركة دورانية، وطبقاً لمبادئ سريان الماء وملامح التصميم، تصنف التوربينات إلى توربينات دفع وتوربينات رد فعل، وفى توربين الدفع يتحول الساقط (فرق المنسوب) المتاح إلى طاقة حركية قبل دخول المجرى،

وتستخلص القدرة الاستفادة من انسياب المياه وهي في الضغط الجوى المعتاد، أما في توربين رد الفعل فتكون قناة الدخول مغمورة بكاملها، ويتناقص كل من الضغط والسرعة على طول المجرى من المدخل إلى المخرج، وفي كلتا الآلتين يتساوى عزم الدوران مع معدل التغير في العزم الزاوى داخل الآلة.

ولمحطات القوى المائية الصغيرة تستعمل المولدات من الأنواع التالية:

- مولدات الحث، وتستخدم عادة عندما توصل القدرة المولدة بالشبكة العمومية.

- مولدات مترامنة، وتستخدم عندما تكون محطات القوى مستقلة بشبكاتها.

### البحوث والتطوير في الهند:

تكمن المشاكل الرئيسية فيما يتعلق بتطوير المحطات المائية الصغيرة فسي النقاط التالية:

١- انخفاض معامل الحمل.

٢- ارتفاع التكلفة الرأسمالية.

٣- مدى الإمكانية المتاحة وعلى وجه الخصوص فيما يخص المناطق ذات الساقط المائى شديد الانخفاض.

٤- تكاليف أعلى فيما يتعلق بوسائل التحكم والإدارة.

ويمثل انخفاض معامل الحمل للمحطات ذات منظومة توزيع منعزلة مشكلة حقيقية تعترض تطوير المحطات المائية الصغيرة، وتعود مشكلة ارتفاع التكلفة الرأسمالية للأعمال المدنية، والمعدات الكهروكيميائية، وربما أسهم التبسيط فى التصميمات فى تخفيض كل من التكلفة الرأسمالية والفترة اللازمة للإنشاء.

وقد أقامت هيئة مصادر الطاقة غير التقليدية مركزًا للطاقة المائية البديلة في IIT بروركي من منظور تطوير بدائل جديدة من منظومات الطاقة المائية الصغيرة في نطاقات الساقط المائي المنخفض جدًا في المجارى المائية الصغيرة والمساقط المائية وبالذات في المناطق الريفية والوعرة. وفيما يلي أهم انجازات المركز:

(أ) تصميم وتطوير محلي لجهاز تحكم الكتروني في الطاقة المنتجة (طور واحد وثلاثة أطوار) للاستعمال مع الوحدات المائية الميكرونية بهدف تقليص النفقات.

(ب) تطبيقات لاستخدام المولدات الحثية.

(ج) تطبيق استخدام التوربينات بدون بوابات صغيرة wicket داخل البوابات الأكبر.

(د) تطويرات في تصاميم المأخذ من نوع السقوط الرأسى مع دوامية vortex لتحسين أداء إنشاءات المأخذ فيما يختص بتنظيف نفسه ذاتيًا.

(هـ) تصميم وتطوير بوابات دائرية عمودية ثابتة لحالات الطوارئ والتحكم مع المحطات المائية الصغيرة ومتناهية الصغر.

(و) تطوير تصميم لجهاز إزالة العوالق ذى تكلفة منخفضة وله ريشات موجهة (تم بناؤه في محطة القوى المائية الصغيرة في كاكروى).

ويعكف المركز فى الوقت الراهن على النشاطات البحثية والتطويرية التالية:

(١) تعديل المضخة لتعمل كتوربين.

(٢) تطوير منظومة تحكم تقوم على معالج ميكرونى للتحكم فى محطات القوى المائية الصغيرة ومتناهية الصغر وحمايتها.

(٣) تطوير توربين ساقط سرعة velocity head لتسخير الطاقة من المياه المتدفقة.

(٤) تطوير مولد ذي تردد ثابت وسرعة متغيرة للتطبيقات المائية متناهية الصغر.

(٥) تطوير جهاز التحويل لغاز بغرض استعماله في توليد القوى.

(٦) التعرف على المشاكل التي تبرز في موقع بعينه ووضع الحلول لها.

(٧) يعمل المركز بالمثل على تطوير منظومات القوى المائية المهيمنة مع مصادر الطاقة المتجددة الأخرى.

المراجع



- 1. Handbook of indian Geography published in 2002 .**
- 2. Handbook of Science and Technology in India published in 2002**
- 3. R.J. Van Overstraten and R.P.Mertens, Phys, Technology and use of Photovoltaics Published by Adam Hilger Ltd .**
- 4. M.A. Green, Solar Cells Published by Prentice Hall.**
- 5. Ken Zweibel, harnessing Solar Power Published by Plenum Press.**
- 6. R.Pool, Science 241,900 (1988).**
- 7. Department of Energy Report DOE/CH 10093-7(Solar Energy Research Institute Golden, CO 1987) .**
- 8. P. Maycock, Ed.PV News 8, 2 (1989).**
- 9. D.E. Carlson and C.R. Wronski, Appl. Phys. Lett. 28 671 (1976)**  
**.**
- 10. H.N. Post and M.G. Thomas Sub. Energy 41, 465 (1998).**
- 11. D.Morris EPRI J. 13, 46 (1998).**
- 12. R. Mc Cormack, Energy Dailey 15, 1 (1987).**



13. J.A. Duffie, W.A. Beckman "Solar Engineering of Thermal Processes", John Wiley and Sons, New York.
14. H.C. Hottel and B.B. Woertz Transactions of the American Society of Mechanical Engineers 64 91 (1942) "Performance of Flat-plate Solar Heat Collectors" .
15. F.S. Johnson Journal of Meteorology 11 431 (1954) "The Solar Constant" .
16. M.P. Thekaekara, Solar Energy 18 309 (1976) "Solar Radiation Measurement : Techniques and Instrumentation" .
17. A. Whillier, Solar Energy 9 164 (1965) "Solar Radiation Graphs" .
18. J.S. Hsieh, Solar Energy Engineering, Prentice Hall Inc. (1986).
19. Solar Thermal Power, Solar Technical Information Program, Solar Energy Research Institute, SERI/SP-273-3047 , February, 1987.
20. P.K. Falcone, A handbook for solar central receiver design, Sandia National Laboratories, SAND 86-8009,(1986).
21. S.p. Sukhatme, Solar Energy- Principles of Thermal Collection and Storage, Tata McGraw-Hill, New Delhi (1989).
22. Jerrold H. Krenz, Energy (Conversion and Utilization) published by Allyn and Bacon, Inc.

**23. P. Muffler and R. Cataedi 1978.**

**Methods for regional assessment of geothermal resources,  
Proceedings of the ENEL-ERDA workshop on Geothermal  
Resource Assessment and**

**Reservoir Engineering Larderello, 1977-131-207, ENEL, Rome.**

**24. M.J. Aldrich, A.W. Langhlin and D.T. Gamhill 1981**

**Geothermal resource base of the world :**

**A revision of the EPRI's estimate, technical report I.A. 8531**

**University of California, Los Alamos Nation,'1Laboratory,  
New Mexico.**

**25. W.B. Godlord, C.B. Goddord, C.B. Goddord and D.W.  
Meclain 1989**

**Future air quality maintenance and improvements through the  
expanded use of geothermal energy, Transactions of the  
Geothermal Resources Council 13 : 27-34.**

**26. S.W. Angrist 'Direct Energy Conversion' Allyn and Bacon Inc.  
Boston (1976) .**

**27. J.H. Krenz 'Energy Conversion and Utilization Allyn and  
Bacon Inc. Boston (1976).**

**28. C. Petersen "Method for Transforming the Kinetic Energy of  
Gases into Electrical En-ergy" U.S. Patent No. 1,443, 091  
(January 23, 1923).**

29. E. RUPP, "Method of An Apparatus for Generating Electrical Energy" U.S.Patent No. 1, 916076 (June 27 , 1933) .
30. B. Karlovitz "Process for the conversion of Energy" U.S. Patent No. 2, 210-918 (August 13, 1940).
31. G.W.Sutton and A.Sherman, Engineering Magnetohydrodynamics (New York : McGraw-Hill Book Company, Inc. 1965).
32. L.P. Harris and J.D. Coline "The significance of the Hall Effect for Three MHD Genera-tor Configurations", Transactions of the ASME, Journal of Engg. for Power 83 A(1961) 392.
33. B.C. Lindley , "Some Economic and Design considerations of Large-scale MPD Genera-tors" in symposium on Magnetoplasmadynamic Electrical Power Generation (1976).
34. H.A. Liebhafsky and E.J. Cairns, fuel cells and Fuel Batteries (Nw York : John Wiley and sons, Inc 1968).
35. G.J. Young and R.B. Rozelle, "Fuel Cells" Journal of Chemical education 36 (1959) 68.
36. K.R. Williams, ed, An Introduction to fuel cells (Amsterdam : Elsevier Publishing Co. 1966).
37. S.W. Angrist, Direct energy Conversion, Ist ed. (Boston : Allyn and Bacon, Inc 1965).
38. J.H. Krenz, Energy-Conversion and utilization (Boston Allyn and Bacon, Inc 1976).

39. A.L. Reimann, Thermionic Emission (New York : John Wiley and Sons Inc., 1934).
40. J.M. Houston "Theoretical Efficiency of the Thermionic Energy Converters, Journal of Applied Physics 30. 481-487 , 1959.
41. G.N. Hatsopoulos, "Thermionic Energy Conversion", Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1996.
42. J.F. Morris "Performances of the Better Metallic Electrodes in Cesium Thermionic Con-verters" 7 th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1972.
43. B. Sherman, R. Heiles and R. Ure "Calculation of efficiency of Thermoelectric Device" Journal of Applied Physics 31, 1-16 (1960).
44. S. Lancashire, J. Kenna and P.Fraenkel Windpumping Handbook I.T.Publication (1987) .
45. T.Kovarik, C. Popher and J. Hurst "Wind Energy' Northbrook, Illinois (1979).
46. J.H. Dwinell 'Principals of aerodynamics 'McGraw-Hill, New York (1949).
47. P.C. Putnam 'Power from the Wind' Van Nostrand Reinhold, New York (1948).

**48. D.R. Smith, optimum rotor diameter for horizontal axis wind turbines : the influence of wind shear assumptions wind Engineering 6(1) 12-18 (1982).**

**G.L. Johnson, Wind Energy Systems. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.p. 7-13 (1985).**

**50. E., Rosillo-calle J. Woods and D.O. Hall 1992.**

**Country by country survey of biomass use and potential for energy, Biomass Energy Users Network Information Centre King's College, London.**

**51.B.M. Jenkins, 1989**

**Physical Properties of Biomass in O. Kitani and C.W. Hall, eds, Biomass handbook, 860-891, Gordon and Breach, New York.**

**52. D.O. Hall, 1989**

**Carbon Flows in the biosphere present and further J. Geol. Soc. 146; 175-181.**

**53. B. Bolin. 1986**

**How much CO<sub>2</sub> will remain in the atmosphere ? In B. Bolin, B.R. Doos, J. Jager and R.A. Warrick eds.**

**54. J.R. Bolton and D.O. Hall, 1991**

**The maximum efficiency. of phototsynthesis, Photochemistry and Photobiology 53,545-548.**

**55. D.A. Walker, 1992**

**Excited leaves, Tansley review no. 36.**

**56. C.P. Mitchell, 1990**

**Nutrients and growth in short rotation forestry Biomass 22 : 91-105.**

**57. O.P. Vimal, and P.D., Tyagi, Fuelwood from wastelands yatna Publications, New Delhi, 1986 .**

**58. State of Art Report on gasification of biomass. Interim Report of DNES Project Ministry of Energy Govt. of India by P.P. Parikh, IIT Bombay.**

**59. M. Dayal Renewable Energy-Environment and Development Konark Publishers Pvt. Ltd. 1989.**

**60. Lavi, A. et al. 1973**

**Plumbing the ocean depths : a new source of power, IEEE spectrum October :**

**61. Griekspoor, W. and Van der pot, B 1979**

**OTEC-Principles, problems and progress, offshore Engineer September.**

**62- Pergamon, 1980**

**Ocean Thermal Energy Conversion, Pergamon Press ISSN 0360-5442.**

**63. Internal conference on Energy Recovery (ICOEA) 1989 Ocean Energy recovery, Pro-ceeding of the first ICOER89, American Society of Civil Engineerrrs.**

**64. Solar Energy Research Institute (SERI) 1989**

**Ocean Thermal Energy Conversion : An overview, SERI Golden Colorado.**

**65. La Rance 20 th Anniversary Colloquim papers 1986.**

**66. Fundy Tidal Power Workshop Papers 1990 .**

**67. U.K. Energy Paper 1989**

**The Severn Barrage Project : General Report, U.K. Energy Paper 57**

**68. World Energy Conference 1992**

**Ocean Energy Chapter 3 in World Energy Conference**

**Committee on Renewable Energy Sources**

**Opportunities and Constraints 1990-2020**

**69. J. M. Leishman, and G. Scobie 1976**

**U . K. National Engineering Laboratory Report EAUM25**

**70. X. Liang. Etal 1991**

**3 rd Symposium on Ocean Wave Utilizations Tokyo, Organized by the Japan Marine**

**Science and Technologe Centre Papers G-3 AND G-4 .**

**72. k. Nielsen 1991**

**3 rd Symposium on Ocean Wave Utilization JAMSTEC paper G-7 .**

**73- G. Hagerman and T. Heller, 1988**

**Proceedings of the International Renewable Energy Conferences Hawai 98-110**

**74. J.C. Fisher 1974**

**The Energy Crisis in Perspective, Wiley, New York .**

**75. K.A. Amankwali, J.S.NILI, J.A. Schwarz 1989. Hydrozen storage on superactivated carbon at refrigeration temperatures. International Journal of Hydrogen Energy, 14(7) : 437-447 .**

**76. C. Carpetis 1982. Comparison of the expenses required for the onboard fuel storage systems of hydrogen powered vehicles . International Journal of Hydrogen Energy, 7(1): 61- 77.**

**77. C. Carpetis 1984. An assessment of electrolytic hydrogen production by means of photo-voltaic energy conversion. International Journal of Hydrogen Energy, 9(12) : 969-991 .**

**78. C. Carpetis 1985. Break-even and optimization conditions for overall energy systems wherein hydrogen storage facilities are used. International Journal of Hydrogen En-ergy, 10(12) : 839-850.**



79. C. Carpetis 1988. Storage, transport and distribution of hydrogen. In C J Winter, J NITSCH (EDS), Hydrogen as an energy carrier, pp. 249-289. Berlin : Springer Verlag. 377 pp.
80. C. Carpetis, W . Peschka 1980. A study on hydrogen storage by use of cryoadsorbents. International Journal of Hydrogen Energy, 5(5) : 539 – 554.
81. M. A. DeLuchi 1989. Hydrogen vehicles : an evaluation of fuel storage, performance, safety, environmental impacts and cost. International Journal of Hydrogen Energy, 14(2) : 81 – 130 .
82. F J Edeskuty, K O Jr. Williamson 1979. Liquid hydrogen storage and transmission. In K E Cox, K D Williamson (eds), Hydrogen – its technology and implications, Vol. II. Florida : CRC Prss. 175 pp.
- 83 .U E Lindblom 1985. Hydrodynamic containment of pressurized hydrogen in fractured rock. International Journal Hydrogen Energy, 10(10) : 667-676 .
84. W . Peschka 1992. Status of handling and storage techniques for liquid hydrogen in mo-tor vehicles. International Journal of Hydrogen Energy, 12 (11) : 753- 764.
85. W. Peschka 1992. Liquid hydrogen, fuel of the future. Wien : Springer Verlag. 304 pp.

86. W.Peschka 199. the use of hydrogen for vehicles. IN VDI-Berichte. Nr. 1020 : Proceed-ings 12. VDI / VW Symposium, Wolfsburg, Germany, 1992 (in English) .
87. J B Pholenz, Stine L O. 1962a. New Process promises low cost hydrogen. Oil and Gas Journal, 60 : 82 – 85.
88. J B Pohlenz, L O Stine.1962b. New process makes hydrogen from fuel gases. Hydrocar-bon Processing and Petrol. Ref. 41 : 191 – 194.
89. S. Suda 1987. Metal hydrides. International Journal of Hydrogen Energy, 12(5) : 323 – 331.
90. O. Ullmann 1989. Hydrogen in air transportation and space travel. Brussels : Commis-sion of the European Communities, Contract No. 3338-87-12.
91. K D Williamson, F J Edeskuty 1986. Recent developments in hydrogen technology, Vol. II. Florida : CRC Press. 154 pp.
92. Raymond Jasinki. High-Enerry Batteries, Plenus Press, New York (1967) .
93. Donalt Marics, Wind Power, Rodale Press (1981) .
94. Horne R.and D. Richardson, Proc. Ann. Power Sources Cont. 18, 75 (1964) .
95. Vinal G. Storage Batteries, John Wiley and Sons. New York (1955).

**96. E. Voss, Effects of Phosphoric Acid Additions on the Behaviour of the Lead-Acid Cell : A Review J. of Power Sources, 24 (1988) 171- 184 . 97. Daniel Dendney, "Rivers of Energy : The Hydropower potential" Worldwatch Paper44 (Washington, D.C. : Worldwatch Institute, June 1981), p. 10. Based on data reported in World Energy Supplies.**

**تمارين للمراجعة**



## الباب الأول: مصادر الطاقة:

- ١ - تكلم عن تصنيفات مصادر الطاقة وتبويبها.
- ٢ - ما موقف الاحتياطي الحالى من الفحم فى الهند؟ ناقش تصنيف الفحمات إلى أنواع فيما يختص بمشاكل تعدين الفحم.
- ٣ - تكلم بالتفصيل عن احتياطيات النفط والغاز الطبيعى والإنتاج منهما ومواطن المشاكل فيما يتعلق بهما.
- ٤ - ما ساعات توليد القوى المركبة حالياً بالهند؟ ناقش نسب مساهمة الأنواع المختلفة من محطات القوى فيها.
- ٥ - اكتب باختصار عن القاعدة الصناعية التى استحدثت بالهند فى تقنيات الطاقة المتجددة المتنوعة.
- ٦ - ناقش مزايا وعيوب الابتكارات التقنية فى الهند فيما يختص بالأفرع المختلفة للطاقة المتجددة.

## الباب الثانى: الخلية الشمسية:

- ١ - وضح بالرسومات البيانية التخطيطية عمل الوصلة الكهروضوئية.
- ٢ - ما المتطلبات الأساسية للحصول على خلية شمسية ذات كفاءة؟
- ٣ - ارسم منحنى علاقة نمطياً بين فرق الجهد والتيار عبر الحمل لخلية شمسية تحت مستوى معين من الاستضاءة.

٤ - اثبت أن أقصى مردود من القوى من خلية شمسية يعطى بالعلاقة:

$$ق ح = \frac{أف ح}{بوجد} \div ( ١ + \frac{أف ح}{بوجد} ) . ف ح ( ت ص + ت . )$$

٥ - ما عوامل الأداء المختلفة التى تحد من عمل الخلية الشمسية؟

٦ - اكتب مذكرة عن اختيار المواد لعمل خلية شمسية.

٧ - ناقش الخواص المرغوبة فى أشباه الموصلات لاستعمالها فى خلية شمسية.

٨ - ما المجموعة المعيارية من الخلايا الكهروضوئية؟ ناقش تأثير درجة الحرارة على أداء هذه المجموعة؟

٩ - ناقش أحدث التطورات فى مجال الكهروضوئيات؟

١٠ - ما أهم القضايا والمحددات فى مجال توليد القوى الكهروضوئية؟

١١ - ناقش الجوانب الاقتصادية فى توليد القوى كهروضوئيا.

١٢ - احسب نطاق الطول الموجى للإشعاع الشمسى القادر على إحداث ثنائيات من الإلكترونات والفتحات فى السليكون، علما بأن فجوة الطاقة بالنسبة للسليكون تبلغ ١,١٢ إلكترون فولت ( الإجابة ١,١١ ميكرون).

١٣ - عندما تتعرض خلية كهروضوئية لتشميس قدره ٩٥٠ وات /م<sup>٢</sup> يبلغ تيار القصر ٢٢٠ أمبير /م<sup>٢</sup> على أساس وحدة المساحات من الوصلة المعرضة، فإذا كانت فولتية الدائرة المفتوحة ٠,٦ فولت، ودرجة الحرارة ٣٠٠ على مقياس كلفن، احسب:

(أ) تيار التشبع العكسى.

(ب) قيمة فرق الجهد التى تحقق أقصى قدرة.

(ج) قيمة تيار الحمل الذي يحقق أقصى قدرة.

(د) الحد الأقصى للقدرة.

(هـ) أقصى قيمة لكفاءة التحويل.

(و) مساحة الخلية كي تعطى قدرة مقدارها ١ كيلو وات تحت ظروف الحد الأقصى للقدرة.

ملحوظات:

$$(أ) \quad \frac{ت.س}{ت.س} = ١ - \frac{اف.د}{١٠ \times ١,١٩٣} \quad \frac{٢٢٠}{١٠ \times ١,١٩٣} = \frac{ت.س}{ت.س}$$

$$\frac{ت.س}{١٠ \times ١,١٩٣} = \frac{٢٢٠}{١٠ \times ١,١٩٣} = ١٨ \text{ أمبير} / م^٢$$

(ب) قيمة الفولتية التي تحقق أقصى قدرة تعطى بالمعادلة:

$$\frac{اف.د}{١٠ \times ١,١٩٣} + ١ = \left( \frac{اف.د}{١٠ \times ١,١٩٣} + ١ \right) \quad \frac{ت.س}{ت.س} + ١ = \left( \frac{اف.د}{١٠ \times ١,١٩٣} + ١ \right) \text{ (يمكن تطبيق معادلة نيوتن - رابلسون لحساب الجذور الحقيقية)}$$

نيوتن - رابلسون لحساب الجذور الحقيقية)  $اف.د = ٠,٥٢$  ف

$$(ج) \quad \frac{ت.س}{١٠ \times ١,١٩٣} = \left[ \frac{ت.س}{١٠ \times ١,١٩٣} + \frac{ت.س}{١٠ \times ١,١٩٣} \right] \frac{اف.د}{١٠ \times ١,١٩٣} = ٢١٠ \text{ أمبير} / م^٢$$

$$(د) \quad \frac{أقصى قدرة}{س} = \frac{ت.س}{س} \cdot ف.ح = ١٠٩ \text{ وات} / م^٢$$

$$(هـ) \quad \text{أقصى كفاءة} = \frac{أقصى قدرة}{س} = \frac{١٠٩}{٩٥٠} = ١١,٥\%$$

$$(و) \quad \text{المساحة س} = \frac{القدرة المخرجة المطلوبة}{أقصى قدرة / س} = \frac{١٠٠٠}{١٠٩} = ٩,١٧ \text{ م}^٢$$

١٤ - اكتب مذكرة عن الآفاق المستقبلية للكهروضوئيات؟



## البابان الثالث والرابع:

### الإشعاع الشمسى ومجمعات الطاقة الشمسية:

- ١ - اشرح ما يلى:
  - (أ) زاوية الميل  $\delta$ .
  - (ب) الثابت الشمسى.
  - (ج) الزمن الشمسى.
  - (د) الكتلة الهوائية.
- ٢ - اكتب صيغة تعبر عن الإشعاع القادم من خارج الغلاف الجوى على سطح أفقى.
- ٣ - كيف يمكن تقدير قيمة الإشعاع الشمسى لدى موضع بعينه؟
- ٤ - كيف يحسب متوسط الإشعاع على سطح مائل مثبت؟
- ٥ - ما مجمع الطاقة الشمسية ذو الصفيحة المستوية؟ ناقش كيفية توجيه مجمع شمسى ذو صفيحة مستوية للحصول على أقصى مردود.
- ٦ - بين طريقة لاختبار أداء مجمع شمسى.
- ٧ - ماذا يقصد بمجمعات التركيز؟
- ٨ - تكلم عن التصميمات المختلفة لمسخنات المياه الشمسية.
- ٩ - كيف يمكننا استعمال الإشعاع الشمسى فى أغراض تدفئة الأماكن؟
- ١٠ - ناقش استعمال الإشعاع الشمسى لأغراض تبريد الأماكن.
- ١١ - ناقش الأنواع المختلفة من التقنيات الكهربائية الحرارية الشمسية.

١٢ - احسب طول ساعات النهار على سطح أفقى بنيودلهى (خط عرض  $35^{\circ} 28'$  شمالاً وخط طول  $12^{\circ} 77'$  شرقاً) يوم ١ ديسمبر.

(طول ساعات اليوم  $= \frac{2}{15} \text{ جتا}^{-1} (-\text{ظا } 28,58^{\circ} - \text{ظا } 22,11^{\circ}) = 10,3$  ساعة)

١٣ - احسب الزمن الشمسى المناظر للساعة  $1430$  (التوقيت القياسى الهندى) بمدينة بومباى (خط عرض  $19^{\circ} 7'$  شمالاً، خط طول  $72^{\circ} 51'$  شرقاً يوم ١ يوليو علماً بأن التوقيت القياسى الهندى على أساس خط طول  $82,5^{\circ}$  شرقاً).

الزمن الشمسى  $= 1430 - 4 - (82,5 - 72,85)$  دقيقة  $+ (-4$  دقائق).

$= 1430 - 38,6$  دقيقة  $- 4$  دقائق  $=$  الساعة  $1347$

١٤ - ما الإشعاع الشمسى اليومى على سطح أفقى بافتراض غياب الغلاف الجوى I عند خط عرض  $43^{\circ}$  شمالاً يوم ١٥ إبريل؟

(الإجابة  $33,4$  ميغا جول / م<sup>٢</sup>).

١٥ - ما مقدار الإشعاع الشمسى على سطح أفقى فى غياب الغلاف الجوى عند خط عرض  $43^{\circ}$  شمالاً يوم ١٥ إبريل ما بين الساعة العاشرة والحادية عشرة صباحاً؟

(الإجابة  $3,75$  ميغا جول / م<sup>٢</sup>).

١٦ - ناقش تركيب جهاز البيروانومتر وكيفية عمله.

١٧ - كيف تستعمل البيروهليومتر لقياس الإشعاع الحرارى؟

١٨ - ناقش استعمال جهاز تسجيل درجة سطوع الشمس لقياس فترة هذا السطوع.

١٩ - اشرح المبادئ التى يعمل على أساسها كل من:

(أ) جهاز الطهى الشمسى.

(ب) جهاز تحلية المياه شمسيًا.

(ج) جهاز التجفيف بالشمس.

### الباب الخامس: تخزين الطاقة الشمسية:

١ - ناقش كيفية تخزين الطاقة الشمسية فى أحواض المياه ذات الطبقات.

٢ - اشرح كيفية عمل وحدة تخزين الطاقة من نوع الحوض ذى الحصوات فى منظومة تسخين بالطاقة الشمسية عن طريق الهواء.

٣ - كيف تبين أن التخزين عن طريق التحويلات الطورية يعنى توفيراً فى الحيز مع تطبيقات الطاقة الشمسية؟

٤ - ما المشكلات المتعلقة باستعمال الهيدريدات فى تخزين الطاقة الشمسية؟

٥ - اشرح أساس عمل الحوض الشمسى، وناقش بعضاً من تطبيقاته.

٦ - ناقش قواعد تشغيل وصيانة بطاريات التخزين المستعملة فى المنظومات الكهروضوئية.

٧ - ما تأثير إضافة حمض الفسفوريك للبطاريات الرصاصية الحمضية؟

## الباب السادس: طاقة باطن الأرض الحرارية:

- ١ - ناقش مصادر طاقة الأرض الحرارية المختلفة.
- ٢ - كيف يمكن استغلال طاقة باطن الأرض الحرارية؟
- ٣ - اشرح كيفية عمل محطات القوى بطاقة الأرض الحرارية وناقش التطورات التقنية المختلفة فيها.
- ٤ - ما الآفاق المستقبلية لاستغلال طاقة باطن الأرض الحرارية في الهند؟
- ٥ - كيف تتأثر البيئة نتيجة تشغيل محطات القوى بطاقة باطن الأرض الحرارية؟

## الباب السابع: مولدات القوى المغناطيسية الهيدروديناميكية:

- ١ - قارن بين عمل المولد التوربيني التقليدي والمولد المغناطيسي الهيدروديناميكي.
- ٢ - كيف يتأين الغاز في المولد المغناطيسي الهيدروديناميكي؟
- ٣ - اشرح عمل المولد المغناطيسي الهيدروديناميكي.
- ٤ - ما المشاكل المتنوعة فيما يتعلق بتوليد القوى المغناطيسية الهيدروديناميكية؟
- ٥ - كيف يمكن تقليص الفواقد المغناطيسية في المولد المغناطيسي الهيدروديناميكي إلى الحد الأدنى؟

## الباب الثامن: خلية الوقود:

- ١ - اشرح - برسم تخطيطى - كيفية عمل خلية الوقود.
- ٢ - استخلص صيغة للتعبير عن كفاءة خلية الوقود.
- ٣ - ما العوامل المختلفة التى تحد من أداء خلية الوقود؟
- ٤ - اشرح عمل خلية الوقود الهيدروجينية الأكسجينية، وبين أن أقصى كفاءة لها تبلغ ٨٣%.
- ٥ - ما أنواع خلايا الوقود المختلفة؟ اشرح أداء كل منها.
- ٦ - ماذا يقصد بخلايا الوقود التجديدية؟

## الباب التاسع: المولدات الأيونية الحرارية والكهروحرارية:

- ١ - ما المبدأ الأساسى فى عمل المولد الأيونى الحرارى؟
- ٢ - ما الوضعيات الرئيسية لتشغيل المحولات الأيونية الحرارية العاملة ببخار السيزيوم؟
- ٣ - ناقش الخواص المهمة فى مادة مبتعثة جيدة للاستعمال فى محول أيونى حرارى.
- ٤ - حلل عمل مولد كهروحرارى.
- ٥ - استنبط صيغة للتعبير عن القدرة المتحصل عليها من مولد كهروحرارى.

## الباب العاشر: طاقة الرياح:

١ - بين أن كثافة طاقة الرياح  $F_R = \frac{1}{2} \rho C^3$ ، حيث  $\rho$  هي كثافة الهواء،  $C$  هي سرعة الرياح.

٢ - ما أقصى قدرة يمكن استخلاصها من تيار من الرياح؟

٣ - اكتب الصيغة التي تعبر عن دالة كثافة احتمالية  $R$  الى.

٤ - اشرح المبدأ في تحويل طاقة الرياح

٥ - ناقش المتغيرات التالية التي تراعى عند تصميم الجزء الدوار:

(أ) الخطوة.

(ب) نسبة الإشغال.

(ج) نسبة السرعة الطرفية.

(د) معامل الأداء.

(هـ) عزم الدوران.

٦ - ابحث تصميمات الدوار المختلفة والمزايا والعيوب النسبية في كل منها.

٧ - كيف يتم تقييم صلاحية موقع ما لتشييد منظومة لقوى الرياح به؟

٨ - اشرح - برسم تخطيطي - الخطوات المتخذة لمعالجة البيانات عن الرياح.

٩ - ما قيمة القدرة الخارجية المتاحة من توربين رياح؟

- ١٠ - ما المنظومات الفرعية المساعدة للتوربين الرياحى؟
- ١١ - ناقش الوضع الحالى والآفاق المستقبلية لاستغلال طاقة الرياح بالهند
- ١٢ - جزء دوار فى توربين رياحى، قطره ٦ أمتار وله ٢٤ ريشة عرض كل منها ٠,٣٥ م.

احسب نسبة الإشغال:

$$\text{الإجابة: (نسبة الإشغال} = 100 \times \frac{0,35 \times 24}{6 \times \pi} = 45\% \text{).}$$

- ١٣ - جزء دوار قطره ٦ أمتار يدور بمعدل ٢٠ لفة / دقيقة، وتبلغ سرعة الرياح ٤ م / ث احسب نسبة السرعة الطرفية للدوار

$$\text{الإجابة: (نسبة السرعة الطرفية} = \frac{60 \div 20 \times 6 \times \pi}{4} = 1,6 \text{).}$$

### الباب الحادى عشر: الطاقة من المصادر الحيوية:

- ١ - بين بالرسم كيف تشكل الطاقة من المصادر الحيوية نحو ١٥% من الاستهلاك العالمى من الطاقة، ٣٨% من الاستهلاك الكلى فى الدول النامية.
- ٢ - لماذا تعتبر المصادر الحيوية للطاقة ذات أهمية خاصة فى الدول النامية مثل الهند؟
- ٣ - ناقش كفاءة إنتاج المادة الحيوية وتداخليات ارتفاع نسبة ثانى أكسيد الكربون على إنتاجها.
- ٤ - اكتب بإيجاز عن التطورات فى مجال الطاقة من المصادر الحيوية.
- ٥ - ناقش الموقف الحالى لتقنيات تحويل الطاقة الحيوية.

- ٦ - اشرح عمل مختلف أنواع محولات المادة الحيوية لغاز.
- ٧ - ما الآفاق المستقبلية لتطور الغاز الحيوى بالهند؟
- ٨ - تكلم عن مصانع الغاز الحيوى المتطورة بالهند.
- ٩ - ما المشاكل المختلفة التى تعيق تطور إنتاج الغاز الحيوى؟

### الباب الثانى عشر: تحويل طاقة المحيطات الحرارية:

- ١ - اشرح تقنية تحويل طاقة المحيطات الحرارية.
- ٢ - ما أنشطة البحوث والتطوير المتنوعة فى مجال تحويل طاقة المحيطات الحرارية؟
- ٣ - ما الآثار البيئية المحتملة نتيجة تشغيل محطة لتحويل طاقة المحيطات الحرارية؟

### الباب الثالث عشر: طاقة الأمواج وموجات المد والجزر:

- ١ - ناقش الأسباب وراء حدوث موجات المد والجزر.
- ٢ - ما أهم أنشطة البحوث والتطوير المختلفة فى مجال طاقة موجات المد والجزر؟
- ٣ - ابحث الآثار البيئية المتنوعة الناجمة عن تشغيل محطة قوى بطاقة موجات المد والجزر.
- ٤ - كيف تتولد الأمواج فى المحيطات؟



- ٥ - ناقش مصادر طاقة الأمواج وتقنياتها.
- ٦ - اكتب مذكرة عن أنشطة البحوث والتطوير في مجال طاقة الأمواج.
- ٧ - ما تكلفة الكهرباء المنتجة من محطة قوى بطاقة الأمواج؟ تحدث عن مختلف الآثار البيئية لاستغلال طاقة الأمواج؟

### الباب الرابع عشر: الطاقة من الهيدروجين:

- ١ - لماذا يشار إلى الهيدروجين على أنه مصدر ثانوى للطاقة؟
- ٢ - ما القضايا الأساسية التى يلزم بحثها عند إدراج الهيدروجين كمصدر للطاقة؟
- ٣ - ناقش أحدث التطورات فى تقنية تخزين الهيدروجين.
- ٤ - اشرح تصنيف منظومات تخزين الهيدروجين وأجهزتها.
- ٥ - ما الأساليب المختلفة لتخزين الهيدروجين؟
- ٦ - اكتب مذكرة عن تكلفة تخزين الهيدروجين.
- ٧ - ناقش تكلفة التخزين لمنظومات تخزين الهيدروجين الثابتة الضخمة.

### الباب الخامس عشر: محطات القوى الكهرومائية متناهية الصغر:

- ١ - كيف تولد الطاقة الكهربائية فى محطة القوى الكهرومائية؟
- ٢ - ناقش الإمكانيات الحالية فى مجال الطاقة الكهرومائية.
- ٣ - كيف تصنف محطات القوى الكهرومائية الصغيرة؟

- ٤ - ما مفهوم القوى الكهرومائية متناهية الصغر بالهند؟ وما إمكانياتها؟
- ٥ - ما النقاط التي ينبغي أخذها في الاعتبار لدى تصميم مشروع لقوى كهرومائية متناهية الصغر؟
- ٦ - ناقش الملامح الرئيسية لمخطط محطة القوى الكهرومائية متناهية الصغر.
- ٧ - ما أهم أنشطة البحوث والتطوير الأساسية التي تجرى في الوقت الراهن بالهند في مجال القوى الكهرومائية متناهية الصغر؟



## نموذج لورقة أسئلة امتحان جامعى

### لدرجة البكالوريوس

امتحان الفصل الدراسى السابع عام ٢٠٠٤ - ٢٠٠٥

فى مادة مصادر الطاقة غير التقليدية

الزمن المسموح به: ٣ ساعات مجموع الدرجات الكلى: ١٠٠ درجة

المطلوب حل جميع الأسئلة

١ - أجب على أربعة أجزاء مما يلى: ( $٥ \times ٤ = ٢٠$  درجة)

(أ) ناقش ما إذا كان إدخال مفهوم مصادر الطاقة غير التقليدية إلى بلدنا متاحًا.

(ب) ما العقبات من الناحية العملية فى استغلال مصادر الطاقة غير التقليدية؟

(ج) ناقش مزايا وعيوب ومصادر الطاقة غير التقليدية مقارنة بمصادر الطاقة التقليدية.

(د) ما العوامل التى تحد من استعمال الخلايا الشمسية؟

(هـ) ناقش آلية عمل الخلية الشمسية من ناحية فيزيائيات أشباه الموصلات.

(و) ما المواد المستخدمة فى تصنيع الخلايا الشمسية؟ وما نطاق جهودها الكهربى؟

٢ - أجب على أربعة أجزاء مما يلي: (٥ × ٤ = ٢٠ درجة)

- (أ) ناقش كيفية عمل مجمع شمسي ذي صفائح مستوية.
- (ب) ناقش كيفية أداء المجمعات الشمسية ذات الصفائح المستوية.
- (ج) تكلم عن المواد المختلفة المستعملة في تصنيع المجمعات الشمسية ذات الصفائح المستوية.
- (د) ناقش مدى إتاحة طاقة جوف الأرض الحرارية.
- (هـ) كيف تتم التدفئة بالطاقة الشمسية موضحاً إجابتك برسم تخطيطي لذلك؟
- (و) كيف يجري تركيز الإشعاع في المجمعات الشمسية ذات شكل القطع المكافئ المجسم؟

٣ - أجب عن جزأين مما يلي: (١٠ × ٢ = ٢٠ درجة)

- (أ) تكلم عن أسس عمل محطات القوى المغناطيسية الهيدروديناميكية.
- (ب) ما الأنواع المختلفة المتاحة من خلايا الوقود؟
- (ج) ناقش كيفية أداء خلايا الوقود المتاحة المختلفة، وما محدداته؟

٤ - أجب عن جزأين مما يلي: (١٠ × ٢ = ٢٠ درجة)

- (أ) اشرح نظرية عزم الحركة فيما يختص بقدرة الرياح.
- (ب) تكلم عن خصائص الرياح المميزة، وعن أداء منظومات تحويل الطاقة والعوامل التي تحددها.
- (ج) اشرح كيف يمكن تحويل الطاقة من المصادر الحيوية إلى كهرباء.

هـ - أجب عن جزأين مما يلي (١٠ × ٢ = ٢٠ درجة)

(أ) ناقش نظرية منظومات تحويل طاقة المحيطات الحرارية والمبادئ الأساسية في عملها.

(ب) ناقش المبادئ الأساسية في منظومة تحويل طاقة الأمواج وموجات المد والجزر، وكيفية عملها.

(ج) تكلم عن أداء محطات القوى القائمة على تحويل طاقة الأمواج وموجات المد والجزر ومحدداتها.



## المؤلفان فى سطور

د. س. شاوهان

- هو نائب رئيس الجامعة الفنية فى "لوكناو".
- حاصل على درجات البكالوريوس والماجستير والدكتوراه فى الهندسة ونظم القوى.
- له بحوث مع وكالة "ناسا"، ونال جائزة "المهندس" لسنة ٢٠٠١ من معهد المهندسين.
- كما أن له ٤١ بحثاً فى مجالات الطاقة.

س. ك. سريفا ستافا:

- هو أستاذ الفيزيائيات فى معهد الهندسة والتكنولوجيا بلوكناو.
- حاصل على الماجستير والدكتوراه فى مجال الطاقة غير التقليدية.
- وله فيها ٥٠ بحثاً، كما أنه أشرف على العديد من الرسائل العلمية عن الطاقة المتجددة.





## المترجم فى سطور

عاطف يوسف محمود

- حاصل على درجة البكالوريوس فى الهندسة الميكانيكية - جامعة القاهرة فى ١٩٦٦.
- حاصل على درجتى الماجستير (١٩٧٢) والدكتوراه (١٩٧٦) فى صناعة الحديد والصلب.
- له بحوث علمية عديدة باللغات العربية والإنجليزية والروسية نشرت فى مجلات عربية وأجنبية.
- حائز على لقب مهندس استشارى من نقابة المهندسين المصرية فى مجال دراسات الجدوى وتقييم المشاريع الصناعية.
- يقوم بالترجمة ونشر المقالات العلمية: مجلة العربى الكويتية.
- قام بترجمة كتب "السفر عبر الزمن فى كون أينشتاين" تأليف ريتشارد جوت، المرجع فى روايات الخيال العلمى "لكيـث بوكـر وأن مارى توماس"، منظومتنا الشمسية بين الصدفة والمصير "تأليف ستيفارت تيلور"، منظور جديد فى كونيـات الفيزياء الفلكية، تأليف مارتن ريس، وذلك لحساب المركز القومى للترجمة.

التصحيح اللغوى: أيمن صابر

الإشراف الفنى: حسن كامل







ينصب اهتمام العالم بأسره اليوم على الحفاظ على البيئة، ومن شأن مصادر الطاقة غير التقليدية أن توفر طاقة نظيفة تقلل من تأثير التلوث والتصحر المتزايدين. ويناقش هذا الكتاب التطورات الجارية في مجال مصادر الطاقة غير التقليدية وتطبيقاتها، وقد تم فيه تغطية رءوس الموضوعات بصورة تامة، بما يكفل لطلبة درجة البكالوريوس الفنى الانتفاع به فى مناهجهم الدراسية مثل مصادر الطاقة غير التقليدية، والطاقة المتجددة، وهندسة الطاقة الشمسية وتشمل الموضوعات: الإشعاع الشمسى، ومجمعات الطاقة الشمسية، ومصادر الطاقة، والخلايا الشمسية، وتوليد الطاقة المغناطيسية الهيدروديناميكية، وطاقة الرياح، والمصادر الحيوية للطاقة، واستغلال طاقة المحيطات الحرارية، وطاقة الأمواج وموجات المد والجزر، والطاقة من الهيدروجين، ومحطات القوى الكهرومائية الصغيرة، وتخزين الطاقة الشمسية.